



黄河下游生态需水量及其估算

作者: 石伟 王光谦

通过分析黄河下游1958~2000年实测生态可用水, 探讨生态需水量内涵, 根据黄河特殊性 & 黄河生态需水量的研究现状, 将维持和保护河流功能的黄河下游生态需水量分为汛期输运水量和非汛期生态基流量, 在平滩流量输运能力最强的前提下, 估算黄河下游汛期输运水量为80~120亿m³, 根据实测资料估算作为黄河下游水量控制断面花园口水文站和作为河口地区水量控制断面利津水文站的非汛期生态基分别为80~100亿m³和50~60亿m³。同时指出对黄河下游水沙调控和黄河流域水资源“准市场”的形成, 是黄河下游生态需水量实现的保证。

黄河下游生态需水量及其估算 石伟, 王光谦 (清华大学水沙科学教育部重点实验室, 北京, 100084) 摘要: 通过分析黄河下游1958~2000年实测生态可用水, 探讨生态需水量内涵, 根据黄河特殊性 & 黄河生态需水量的研究现状, 将维持和保护河流功能的黄河下游生态需水量分为汛期输运水量和非汛期生态基流量, 在平滩流量输运能力最强的前提下, 估算黄河下游汛期输运水量为80~120亿m³, 根据实测资料估算作为黄河下游水量控制断面花园口水文站和作为河口地区水量控制断面利津水文站的非汛期生态基分别为80~100亿m³和50~60亿m³。同时指出对黄河下游水沙调控和黄河流域水资源“准市场”的形成, 是黄河下游生态需水量实现的保证。关键词: 黄河下游; 生态需水量; 平滩流量; 汛期输运水量; 非汛期生态基流量

中图分类号: P344; P333 河流具有储存水量、迁移污染物、为动植物提供栖息地等多种功能, 因而具有经济、社会和环境价值。河流通常处于水流流动、泥沙输运和其它变量的动态平衡中, 而人类的活动, 如工业与生活用水等, 都会改变河流的这种动态平衡[1]。近年来, 黄河下游连年出现长时间枯水断流、地下水位下降, 河口三角洲湿地受到严重威胁[2, 3]。河流生态环境的恶化影响到其经济、社会等价值的发挥。水资源已成为区域经济发展和环境保护的主要限制因子, 在水资源开发利用中必须考虑生态需水量[4], 因为生态需水量是水资源在生态环境建设和国民经济各行业合理分配的关键依据[5]。保障生态环境需水, 是实现水资源可持续利用的重要基础[6]。目前, 不同使用者对河流生态需水量对其理解有差异[3-20]。本文根据黄河特殊性 & 黄河生态需水量的研究现状, 将维持和保护河流功能的黄河下游生态需水量分为汛期输运水量和非汛期生态基流量, 在探讨其内涵基础上分别做估算。

1 生态需水量生态需水量一般指改善生态环境质量或维护环境质量所需的水量[4, 5, 8-10]。从广义上来讲, 维持全球生物地球化学平衡诸如水热平衡、源汇库动态平衡、生物平衡、水沙平衡、水盐平衡所需要的最低水分消耗都是生态需水[4-7, 9]。用于河流水质保护和鱼类回游等所需的最低水量也属生态需水的范畴[4-5]。对于生态环境脆弱区, 生态需水应当指维护生态环境不再进一步恶化并逐渐改善所需地表水和地下水资源总量[5]。潘启民等将流域内一定时期存在的天然绿洲、河道内生态体系以及人工绿洲内防护植被体系等维持其正常生存与繁衍等所需要的最低水量[15]。做为维持现有生态面积的必要水量, 低于这一水量, 生态环境将呈现退化趋势[11]。贾宝全根据不同植被类型的面积计算了新疆的生态需水量[5, 17]; 王让会根据对地下水、土壤水、植物生长与生态环境状况之间定量关系界定的生态水位, 用植被耗水模式及定额法相结合的方法, 估算了塔里木河、叶尔羌河、和田河、开都河—孔雀河4个流域源流区及塔里木河干流3个目标年的生态需水量[5, 18]; 李丽娟将海滦河流域生态需水量分为3个部分: 以多年实测最小月平均径流量计的河流基本生态环境需水量, 以多年平均输沙量与多年最大月平均含沙量之比计的汛期输沙排盐需水量, 以维持湖泊洼地水量平衡而消耗于蒸发的净水量计的湖泊洼地生态需水量[3]; 严登华将东辽河流域生态需水量也分为3个部分: 以各月平均输沙量与历年最大平均含沙量之比计的排沙需水量, 水面蒸发需水量, 以洪泛地地面蒸发量计的洪泛地生态需水量[19]。潘启民根据天然绿洲、河道内生态体系以及人工绿洲内防护植被体系等估算了黑河中、下游的生态需水量[15]。对于黄河生态需水量, 沈国舫估计输沙用水100亿m³, 加上维持枯水期黄河生态基流及蒸发消耗共160亿m³ [7]; 王礼先估计黄河流域乔木林生态用水量为17亿m³左右, 草地生态用水量为1亿m³ [4]; 牛志明估算黄河流域水土保持需要生态用水100亿m³, 维持水沙平衡生态用水170亿m³, 保护黄河三角洲生态系统及黄河枯季生态基流需50亿m³, 河流水面蒸发为10亿m³, 总计330亿m³ [8]; 王西琴等用段首控制法确定了渭河河道最小环境需水量[12-13]。

2 黄河下游实测生态可用水的变化需要说明的是, 这里的实测生态可用水并不是上节所指, 而是实际用于维持生态环境的水量。图1表示了1958~2000年黄河下游河段引水量及实测生态可用水占相应的当年花园口水文站实测年径流量的百分比。其中河段引水量是指从黄河干、支流引的包括输水损失在内的新鲜水量, 分别用于农业、工业城市生活、农村生活及其它; 实测径流量是天然径流量在受到自然和人类活动影响后产生的结果, 将花园口水文站实测径流量作为黄河下游来水量, 我们用花园口水文站实测年径流量与黄河下游河段引水量之差值作为黄河下游实测生态可用水。同时将各时段平均的黄河

河下游年引水量、实测生态可用水及花园口水文站实测年径流量分别列于表1。其中1958~1959年为天然情况,属丰水多沙年;1960~1964年为三门峡水库“蓄水拦沙”“滞洪拦沙”,属丰水年;1965~1973年为三门峡水库“滞洪排沙”,属平水多沙年;1974年以后三门峡水库“蓄清排浑”,1974~1980年水少沙少,1981~1985年丰水少沙,1986年以后由于龙羊峡水库投入运用及其与刘家峡水库联合运用[21-22]、上中游降水量偏少[23]等原因,黄河下游属枯水枯沙年。从图1及表1可看到,除由于修建三门峡水库蓄水以外,从1965年起,黄河下游引水量及其占来流量百分比呈逐时段增加趋势:年平均引水量从1965~1973年的39.78亿m³增加到1986~2000年的108.02亿m³,占来流量百分比从1965~1973年的9.4%增加到1986~2000年的40.15%;而相应的实测生态可用水及其占来流量百分比呈逐时段下降趋势:年平均实测生态可用水从1965~1973年的383.43亿m³降到1986~2000年的161.00亿m³,占来流量百分比从1965~1973年的90.60%降到1986~2000年的59.85%。其中,1986~2000年期间年平均实测生态可用水161.00亿m³,与沈国航对黄河生态用水估算的160亿m³在数量上相当[7]。但黄河下游近年来出现的断流、洪水频繁、河道淤积、小水大灾[21, 24];水环境容量萎缩、水质恶化[24];河口三角洲萎缩、河口地区生态系统多样性受损[24-25]等等,说明黄河下游生态环境在恶化。

3 黄河下游生态需水量

为使黄河下游生态需水量有一个在年内的时间分配并达到某些河流功能的流量要求,我们将黄河下游生态需水量分为两个部分:

3.1 汛期输运水量

汛期输运水量作用是:(1)输送泥沙:黄河水少沙多,其平均含沙量及多年平均年输沙量都是全球最高的。作为黄河下游最重要的功能,泥沙的输运影响着其河床演变,如河道的不断淤积即输沙功能的下降,最终将引发断流、洪水频繁等一系列前文已述问题,必然影响河流其它功能的正常发挥,如调节流量、迁移污染物、作为动植物栖息地等。因而保持必需的输沙用水,对于维持黄河下游河道的正常演变及其功能的维持是首要的条件。黄河下游的泥沙主要来源于中游黄土地区,汛期的暴雨是其产流的主要动力[26]。据实测资料统计,黄河多年平均年径流量中汛期约占60%,汛期输沙量约占年输沙量的85% [24]。因而黄河下游输沙主要集中于汛期。前人研究表明,在一定来水来沙条件下,流量接近于平滩流量时,河道的挟沙力达到最大值[27, 28],此时河道的排沙比也最大[29]。(2)输送污染物:流经大中城市的湟水、大黑河、汾河、渭河、洛河、大汶河等六条支流和干流刘家峡至花园口河段,向黄河下游排放大量废污水,其中含有大量耗氧有机物及其它有毒有害物质。据统计、测算,20世纪90年代初年排放COD(高锰酸钾指数)118wt,石油类8840t,挥发酚类4040t,氰化物437t,砷、汞、六价铬、铅、镉等共计303t[30]。这些污染物是借助于河流中的水流和泥沙运输的。黄河来水流量的大小影响着河流携带污染物的能力,影响着河流的水环境容量及其自净能力,夏军等人已证实增加来水量可以改善河段水环境容量[30];进入黄河的泥沙,给黄河造成一定污染,同时由于其组成中含有相当数量的粘土矿物、无机胶体和一定数量的有机胶体、有机无机复合胶体,对排入黄河的种类繁多的污染物具有显著的吸附作用,从而表现出净化水质的效应,高传德等人通过水质监测数据得到浑水高锰酸钾指数与其含沙量呈正相关[31]。我们通过对黄河下游花园口、涑口水文站1982~1984年实测水质监测数据,采用河流有效流量的各级流量—频率分析的方法,均以1000 m³/s分级,得到相应于耗氧效率和溶解氧效率最大处的流量为6348 m³/s和5640~6348 m³/s(图2),与该时段花园口、涑口水文站的平滩流量相当,从而得到在平滩流量下黄河下游河道对污染物输运能力最强,而且此时其水环境容量也最大的结论。

3.2 非汛期生态基流量

非汛期生态基流量作用是:(1)维持河道不断流。(2)保持合理地下水位,黄河下游两岸农作物深受旱涝盐碱等自然灾害影响[32]。影响作物生长的主要因素是水分和土壤盐分,两者都与地下水位有关。当地下水位过高时,溶于地下水中的盐分受蒸发影响就会在土壤表层聚积,导致盐渍化,不利于作物生长。当地下水位过低时,地下水不能通过毛管上升到作物可以吸收利用的程度,导致土壤干化、作物衰败,发生土地荒漠化。因此把既能减少地下水强烈蒸发返盐,又不造成土壤干旱而影响作物生长的地下水位称为合理地下水位[5]。根据土壤毛管水运移规律和盐渍土改良综合治理实践,将2~4 m作为该地下水位较为合适[33]。(3)维持河口三角洲湿地生态系统稳定:黄河三角洲湿地是在黄河不断冲积、淤积和海水共同作用下形成的[34],具有多种植物群落和种类繁多的动植物资源,并在调节区域水热状况、减缓地表径流波动性、净化水质、控制海岸线侵蚀等方面具有重要作用,是我国的重要湿地生态系统。黄河是形成和维系黄河三角洲湿地生态系统的重要因素[35]。黄河下游生态需水量并不是满足上述各项功能需水量的简单相加,要根据它们之间的相互关系分析确定。

4 黄河下游生态需水量估算

我们将黄河下游生态需水量估算分为以下两个同样的部分:

4.1 汛期输运水量

(1)输沙水量 输送泥沙不仅需要合理的水量,而且需要一个合理的流量过程;为保证河道淤积比较小,还需要有一个适宜的含沙量范围。事实上,前人对实测资料的分析得到,平均流量为1750~3370 m³/s,最大流量为3700~6600 m³/s,一般均不漫滩;平均含沙量为72~121 kg/m³,河道淤积比在20%左右的洪水为高效输沙水流[24, 36-39]。也就是说此时输沙用水量最小,此时流量与平滩流量相当[27-28]。我们从输沙水量的概念出发,考虑河段淤积、引沙后的最小输沙水量计算式为: $q = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0}$ (1) 式中: Q 、 Q_0 为该河段上、下游断面平滩流量 (m³/s); T 、 T_0 为泥沙冲淤量 (t), 冲为负、淤为正; T 为引沙量 (t); T_0 为泥沙冲淤时间或引沙时间 (s); S 为上游断面的水流挟沙力 (kg/m³), 采用黄河上广泛使用、又适于其它河流的张红武高、低含沙水流统一计算公式。假设小浪底水库运用后在它的调节作用下黄河下游的平滩流量达到1950~1957年水平,即花园口处3980 m³/s,利津处7040 m³/s;水流挟沙力与1950~1957年水平相当,以花园口作为上游断面,以利津作为下游断面;考虑小浪底水库的运用前20年黄河下游河道基本不淤[24];取年引沙量亿t;取7~10亿t作为下游来沙量,考虑大于0.05 mm的粗泥沙全部淤积于小浪底水库,则淤积量为1.4~2.0亿t(约占来沙量20%),即2001年小浪底水库投入运行以后,实际年均进入黄河下游输送的泥沙量为4.6~6.0亿t。这些计算条件与上述前人对实测资料分析是一致的。则由式(1)计算得到小浪底水库建成以后,黄河下游在维持良好输沙功能的前提下的最小输沙用水总量为80~120亿m³ [40]。(2)输送污染物用水量 由于我们对黄河下游实测水质监测数据的分析,得到黄河下游河道在平滩流量下对污染物输运能力最大,水环境容量也最大,因此根据平滩流量估算的黄河下游用水量不仅是输沙最经济的水量,也是输送污染物最经济的水量。同样,输送污染物的最佳流量是平滩流量,与前人对实测资料分析相对应:平均流量1750~3370 m³/s,最大流量3700~6600 m³/s。

4.2 非汛期生态基流量

由于缺乏实际观测资料,作为估算,我们取系列年,将此系列年的所有年内最小月平均流量取算术平均值再乘以8个月的时间(以秒计),得到的水量(以亿m³计)作为黄河下游维持河道不断流、保持合理地下水位、维持河口三角洲湿地生态系统稳定的非汛期生态基流量的估算值。我们对花园

口、艾山、利津水文站1951~1959年、1960~1964年、1965~1973年、1974~1980年、1981~1985年、1986~1997年6个系列年分别做了计算。作为估算,不妨2月份以29天计。计算式如下: $q = 243 \times 24 \times 3600 \times \times 10$ (2) 式中为非汛期生态基流量(亿m³),为系列年的年数,为第i年第j月的月平均流量(该年最小月均流量)。(图3,表2):除去1960~1964年间的三门峡水库“蓄水拦沙”“滞洪拦沙”期,我们可以看出,花园口水文站在丰水年实测生态基流量可以达到100亿m³,在平水或枯水年可以达到80亿m³左右,所以本文将80~100亿m³作为黄河下游花园口水文站生态基流量。考虑到1972年以后利津水文站出现自然断流现象,参照艾山水文站实测生态基流量,本文将50~60亿m³作为黄河下游利津水文站生态基流量。综上所述,作为黄河下游水量控制断面花园口水文站和作为河口地区水量控制断面利津水文站的生态需水量分别为其汛期输运水量和非汛期生态基流量之和,即160~220亿m³和130~180亿m³。

5 结果与讨论 对黄河下游汛期输运水量的估算,是建立在平滩流量下河流水流输运泥沙及污染物能力最强的基础上,由输沙水量的概念、根据沙量平衡原理计算得到的,是一种理想的、对维持黄河下游输运功能最经济用水量的估算,是黄河下游汛期平均状况最佳运输能力下输运用水量。

参考文献 (References) [1] The Federal Interagency Stream Restoration Working Group. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices [OL]. 1998: 1-1~1-3. [2] Shen Maocheng. Guarantee of ecological water demands and protection of wetland resource. China Forestry, 2001, (7): 16-17. [沈茂成. 保障生态用水,保护湿地资源. 中国林业, 2001, (7): 16-17.] [3] Li Lijuan. Environmental and ecological water consumption of river systems in Haihe-Luanhe basins. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 495-500. [李丽娟. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500.] [4] Wang Lixian. Ecological construction of vegetation and ecological water demands. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(3): 5-7. [王礼先. 植被生态建设与生态用水. 水土保持研究, 2000, 7(3): 5-7.] [5] Zhao Wenzhi. Review of several problems on ecohydrological processes on arid zones. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(22): 1851-1857. [赵文智. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 2001, 46(22): 1851-1857.] [6] Project Group of "Strategic Research on Sustainable Development of Water Resource in China in 21st Century", Chinese Academy of Engineering. Strategic Research on Sustainable Development of Water Resource in China. Engineering Science, 2000, 2(8): 1-17. [中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告. 中国工程科学, 2000, 2(8): 1-17.] [7] Shen Guofang. Ecological environmental construction and protection and utilization of water resources. Soil and Water Conservation in China, 2001, (1): 4-8. [沈国舫. 生态环境建设与水资源的保护和利用. 中国水土保持, 2001, (1): 4-8.] [8] Niu Zhiming. Theory of ecological water utilization and its application for soil and water conservation and ecological environmental rehabilitation. Science and Technology Review, 2001, (7): 8-11. [牛志明. 生态用水理论及其在水土保持生态环境建设中的现实意义. 科技导报, 2001, (7): 8-11.] [9] Feng Huali, Wang Chao, Li Yong. Study on ecological water demand in basin. Environmental Science Trends, 2001, (1): 27-37. [丰华丽, 王超, 李勇. 流域生态需水量的研究. 环境科学动态, 2001, (1): 27-37.] [10] Ren Guangzhao. Sustainable utilization and rational allocation of water resource. Resource Management, 2001, (2): 11-13. [任光照. 水资源可持续利用与合理配置. 资源管理, 2001, (2): 11-13.] [11] The Chinese Academy of Sciences (CAS), the Chinese Academy of Engineering. Some key problems on expediting development of northwestern China. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(5): 489-498. [中国科学院, 中国工程院. 加快西北地区开发的几个关键问题. 地球科学进展, 2000, 15(5): 489-498.] [12] Wang Xiqin, Liu Changming, Yang Zhifeng. Method of resolving lowest environmental water demands in river course (I): theory. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(5): 544-547. [王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究 (I) — 理论. 环境科学学报, 2001, 21(5): 544-547.] [13] Wang Xiqin, Liu Changming, Yang Zhifeng. Method of resolving lowest environmental water demands in river course (II): application. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(5): 548-552. [王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 河道最小环境需水量确定方法及其应用研究 (II) — 应用. 环境科学学报, 2001, 21(5): 548-552.] [14] Liu Changming. Supply-demand analysis of water resource in China in 21st century: study on ecological hydraulic engineering. China Water Resources, 1999, (10): 18-20. [刘昌明. 中国21世纪水供需分析: 生态水利研究. 中国水利, 1999, (10): 18-20.] [15] Pan Qimin. Analysis on ecological water demand in Heihe River Basin. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2001, 13(1): 14-16. [潘启民. 黑河流域生态需水量分析. 黄河水利职业技术学院学报, 2001, 13(1): 14-16.] [16] Jia Baoquan. The conception of the eco-environmental water demand in arid land: taking Xinjiang as an example. Arid Land Geography, 1998, 21(2): 8-12. [贾宝全. 干旱区生态用水的概念和分类. 干旱区地理, 1998, 21(2): 8-12.] [17] Jia Baoquan, Ci Longjun. The primary estimation of water demand by the ecoenvironment in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 243-250. [贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算. 生态学报, 2000, 20(2): 243-250.] [18] Wang Ranghui, Song Yudong, Fan Zili et al. Estimation on ecological water demand amount in four sources and one main stream area of Tarim Basin. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 19-22. [王让会, 宋郁东, 樊自立等. 塔里木河流域“四源一干”生态需水量的估算. 水土保持学报, 2001, 15(1): 19-22.] [19] Li Lijuan, Zheng Hongxing. Environmental and ecological water requirement of river system: a case study of Haihe-Luanhe river system. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(2): 224-230. [20] Yan Denghua. Ecological water demand by river system in East Liaohe River Basin. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 46-49. [严登华. 东辽河流域河流系统生态需水研究. 水土保持学报, 2001, 15(1): 46-49.] [21] Shen Guangqing. Water and sediment change and fluvial process of the lower Yellow River after 1986. Yellow River, 200

0, 22(9): 10-16. [申冠卿. 1986年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析. 人民黄河, 2000, 22(9): 10-16.] [22] Lu Man. Change of water and sediment of the Yellow River in Shandong during 1986-1996. *Hydrology*, 2000, 20(6): 45-47, 36. [吕曼. 黄河山东段1986-1996年水沙变化特征. 水文, 2000, 20(6): 45-47, 36.] [23] Zhang Ren. Some problems on Yellow River regulation in the near future. *Yellow River*, 1999, 21(7): 5-10. [张仁. 近期黄河治理工作中的几个问题. 人民黄河, 1999, 21(7): 5-10.] [24] Chang Bingyan. The Yellow River Water Resource Catchment Reasonable Distribution and Optimal Regulation. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1998. [常炳炎. 黄河流域水资源合理分配和优化调度. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.] [25] Yang Zhaofei. Ecological consideration of dried-up Yellow River. *Environmental Management in China*, 1997, (5): 4-7. [杨朝飞. 黄河断流的生态思考. 中国环境管理, 1997, (5): 4-7.] [26] Chien Ning. Motion of Hyperconcentrated Flow. Beijing: Tsinghua University Press, 1989. [钱宁. 高含沙水流运动. 北京: 清华大学出版社, 1989.] [27] Chien Ning, . *Fluvial Process*. Beijing: Science Press, 1987. 343. [钱宁. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987. 343.] [28] Mai Qiaowei, Zhao Yean, Pan Xiandi et al. Studies on the characteristics of incoming sediment and water discharge and the channel process of the lower Yellow River. In: Li Baoru (ed.), *Science Research Transactions (2)*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1990. 100-146. [麦乔威, 赵业安, 潘贤娣 等. 黄河下游来水来沙特性及河道冲淤规律的研究. 见: 李保如 主编. 科学研究论文集 (第二集). 郑州: 河南科学技术出版社, 1990. 100-146.] [29] Zhao Wenlin (ed.). *The Yellow River Sediment*. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1997. 104, 116-126. [赵文林 主编. 黄河泥沙. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 104, 116-126.] [30] Xi Jiazhi. Water Resource of the Yellow River. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1997. 259-260, 402. [席家治. 黄河水资源. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 259-260, 402.] [31] Gao Chuande. Statistical model of correlation of water quality parameters and sediment concentration and its application. *Yellow River*, 1986, (2): 11-13. [高传德. 水质参数与含沙量相关统计模式及其应用. 人民黄河, 1986, (2): 11-13.] [32] Wu Kai. The conditions and development measures of hydrology and water resources for comprehensive development of agriculture in Huang-Huai-Hai Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1997, 13(1): 101-106. [吴凯. 黄淮海平原农业综合开发的水文水资源条件及其开发对策. 农业工程学报, 1997, 13(1): 101-106.] [33] Wei Youqing. Classification of potential secondary salinization of soil in Huang-Huai-Hai Plain. *Soil and Fertilizer*, 1994, (5): 5-9. [魏由庆. 黄淮海平原土壤次生潜在盐渍化分级研究. 土壤肥料, 1994, (5): 5-9.] [34] Mu Congru. Wetland ecosystems formation and its protection in Yellow River Delta. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 123-126. [穆从如. 黄河三角洲湿地生态系统的形成及其保护. 应用生态学报, 2000, 11(1): 123-126.] [35] Han Yanzhu. Wetland ecosystem and its protection of Yellow River Delta. *Environmental Science and Technology*, 2000, 89(2): 10-13, 46. [韩言柱. 黄河三角洲湿地生态系统及其保护的初步研究. 环境科学与技术, 2000, 89(2): 10-13, 46.] [36] Yue Dejun. Study on the water requirement for sediment transport of the Lower Yellow River. *Yellow River*, 1996, 18(8): 32-33, 40. [岳德军. 黄河下游输沙水量研究. 人民黄河, 1996, 18(8): 32-33, 40.] [37] Zhao Ye'an. Watercourse degradation or aggradation and basic rule in the lower Yellow River. In: Li Baoru (ed.), *Science Research Transactions (1)*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1989. 12-26. [赵业安. 黄河下游河道冲淤情况及基本规律. 见: 李保如 主编. 科学研究论文集 (第一集). 郑州: 河南科学技术出版社, 1989. 12-26.] [38] Qian Yiying. The change of water and sediment of the main stream of the Yellow River and fluvial process. Beijing: China Architecture and Material Industry Press, 1993. 91-95. [钱意颖. 黄河干流水沙变化与河床演变. 北京: 中国建材工业出版社, 1993. 91-95.] [39] Zhao Huaxia, Chen Jianguo, Chen Jianwu et al. On the water volume required for transporting sediment and the fluvial processes in the lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 1997, (3): 57-61. [赵华侠, 陈建国, 陈建武 等. 黄河下游洪水期输沙用水量与河道泥沙冲淤分析. 泥沙研究, 1997, (3): 57-61.] [40] Shi Wei. Preliminary investigation on the water requirement for sediment transport of the lower Yellow River. In: 29th IAHR Congress Proceedings. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 151-158. Estimation of Ecological Water Requirement for the Lower Yellow River SHI Wei, WANG Guangqian (Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China) Abstract: Key words:

关键词: 黄河下游; 生态需水量; 平滩流量; 汛期输运水量; 非汛期生态基流量

