

# 河道生态基流保障引起的农业损失量计算

田若谷<sup>1,2</sup>, 李怀恩<sup>1</sup>, 刘铁龙<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 长江岩土工程总公司, 湖北 武汉 430010; 3. 陕西省江河水库管理局, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 为了科学协调水资源短缺地区农业用水与生态基流的矛盾问题, 推动生态基流保障工作, 从优先保障生态基流后农业受到影响的角度出发, 确定了不同保障水平下的农业损失量。以渭河干流宝鸡段为例, 定量计算了生态基流调控值在  $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$  之间时宝鸡峡灌区的农业产值损失与产量损失, 并分析了生态基流保障前后保障率变化情况。结果表明: 生态基流调控值在  $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$  之间时, 平水年农业产值损失在  $1.04 \times 10^8 \sim 2.54 \times 10^8$  元之间, 枯水年农业产值损失在  $2.99 \times 10^8 \sim 4.06 \times 10^8$  元之间, 特枯年农业产值损失在  $4.78 \times 10^8 \sim 6.61 \times 10^8$  元之间。减少农业灌溉引水后, 河道生态基流保障率明显提高。

**关键词:** 生态基流; 保障率; 农业损失量; 渭河干流宝鸡段

中图分类号: TV213.4; S27

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0111-06

## Calculation of agricultural loss caused by river ecological basic flow protection

TIAN Ruogu<sup>1,2</sup>, LI Huaien<sup>1</sup>, LIU Tielong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan 430010, China;

3. Shaanxi Provincial River Reservoir Management Bureau, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** In order to scientifically coordinate the contradiction between agricultural water use and ecological base flow in water shortage areas, and to promote the ecological base flow guarantee work, this paper determines the amount of agricultural losses under different levels of protection from the perspective of the impacted agriculture from ensuring the ecological base flow. Taking the Baoji section of the Weihe River as an example, the agricultural output value loss and yield loss in Baojixia Irrigation District were calculated quantitatively when the ecological base flow regulation value was between 5 and  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , and the change of the protection rates before and after the ecological base flow protection was analyzed. The results showed that when the ecological base flow regulation value was between 5 and  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , the agricultural output value loss were  $1.04 \times 10^8 - 2.54 \times 10^8$  yuan,  $2.99 \times 10^8 - 4.06 \times 10^8$  yuan and  $4.78 \times 10^8 - 6.61 \times 10^8$  yuan, respectively in normal year, dry year and extremely dry year. The river ecological base flow protection rate had significantly improved, when the diversion for agricultural irrigation reduced.

**Key words:** river ecological basic flow; guarantee rate; agricultural loss; Baoji section of Weihe River

## 1 研究背景

长时间以来, 人们主要考虑社会经济增长, 过度开发河流水资源, 忽略了河流生态环境用水的需求, 使水资源供需矛盾突出<sup>[1-2]</sup>。由于河流生态环境用水得不到足够重视, 水资源极不均衡的开发利用加

速了河流生态系统功能的衰退, 许多河道出现了生物多样性减少、河道断流等诸多生态环境问题<sup>[3-7]</sup>。

正是由于这些生态环境问题的屡次出现, 人们逐渐开始关注人类活动对自然、生态带来的不利影响。

农业灌溉用水在为人类带来巨大经济利益的同时, 也与河道生态环境用水形成矛盾, 使河道生态基

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479162)

作者简介: 田若谷(1994-), 女, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事水资源保护研究。

通讯作者: 李怀恩(1960-), 男, 陕西商南人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源保护研究。

流得不到保证<sup>[8]</sup>,严重影响了河流健康<sup>[9]</sup>。为了保障生态基流,势必会减少农业灌溉引水量,从而产生农业经济损失。近些年,为保障河道生态用水而减少其他部门用水产生的损失与补偿问题已成为研究的热点<sup>[10]</sup>。怎样协调、解决河道生态基流保障与农业灌溉引水二者之间的矛盾,已成为当前研究的新方向。

目前,国内外已有学者对河道生态流量保障产生的代价与补偿问题展开了研究。Qureshi等<sup>[11]</sup>重点研究了澳大利亚墨累流域保障生态用水时产生的农业机会成本。Jones等<sup>[12]</sup>使用随机动力过程模型分析了为保障生态用水而减少农业用水时产生的农业经济损失。Sisto<sup>[13]</sup>研究了保障俄罗斯北部奇瓦沙漠生态需水后的农业补偿标准。Xue等<sup>[14]</sup>建立动态离散化的混合贝叶斯网络法,以此为基础评估了新疆塔里木盆地南缘的农业灌溉与生态流量之间的用水平衡,并对不同利益受损者的农业经济补偿进行了量化。成波等<sup>[15]</sup>引进作物需水系数,通过分析农业用水减少量与产量损失的关系,提出了宝鸡峡灌区农业生态补偿量计算方法。张倩等<sup>[16]</sup>使用水分生产函数模型计算了渭河关中段生态基流保障引起的宝鸡峡灌区、交口抽渭灌区的农业损失量。当前河道生态基流保障引起的农业损失研究很少考虑作物在不同生长时期对水量的敏感性,以及各生育期缺水对作物总产量造成的影响。

近年来,陕西省政府与陕西省渭河流域管理局提出了“先生态、再灌溉、后发电”的用水原则。基于此,本文结合渭河干流宝鸡段实况,针对农业灌溉引水与生态基流保障之间的矛盾,建立了农业经济损失模型。通过简化的 Jensen 模型,建立了作物生长过程中水量与作物实际产量之间的关系,计算作物受到水分胁迫后的实际产量,并将灌区现状条件下的作物产量与受胁迫后的实际产量进行对比,从而合理界定了保障河道生态基流后的农作物产量损失和直接经济损失量,以期促进河流生态系统健康发展,为水资源短缺地区的水资源科学管理和保障决策提供支撑。

## 2 研究区域概况

渭河干流关中段位于渭河流域中下游,包含宝鸡、咸阳、西安、渭南、铜川、杨凌<sup>[17]</sup>6个行政区。其中渭河干流宝鸡段的长度约为224 km<sup>[18]</sup>。宝鸡峡引渭灌区地处关中西部<sup>[19]</sup>,灌区东西长181 km,南北平均宽14 km,具有窄而长的特点<sup>[20-21]</sup>。

渭河干流宝鸡段天然来水量有限,用水矛盾突

出,尤其是宝鸡峡灌区建成后,灌区从渭河干流宝鸡段引水量较大,灌溉用水大量挤占河道生态用水,造成了渭河宝鸡市区段河道生态基流无法保障等生态环境问题。

## 3 研究方法与数据来源

### 3.1 供水量减小引起的农业损失量计算方法

水是影响农作物产量的重要因素之一。在其他外界条件相同时,为了研究供水量变化对作物产量的影响,引进作物生长 Jensen 模型。

3.1.1 建立作物生育期 Jensen 模型 作物在不同生育时期对水分的敏感性不同。每一生长阶段缺水都会对作物产量产生不同程度的影响,为了更好地描述作物不同生长阶段缺水量对作物产量的影响,建立作物产量 Jensen 模型,公式为:

$$\frac{y_a}{y_m} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (1)$$

式中: $n$ 为作物生长不同阶段; $y_a$ 为作物受水量影响后得到的实际单产量,kg/hm<sup>2</sup>; $y_m$ 为作物不受水分影响时(即各生育阶段均不缺水的充分灌溉情况下)作物的最优单产量,kg/hm<sup>2</sup>; $ET_{ai}$ 和 $ET_{mi}$ 分别为作物第 $i$ 个生长阶段的实际蒸发量和潜在蒸发量,mm; $\lambda_i$ 为作物第 $i$ 个生长阶段的作物水分敏感系数。

3.1.2 Jensen 模型的简化 当实际蒸发量 $ET_a$ 小于潜在蒸发量 $ET_m$ 时,作物将会产生水分胁迫,产量将会受到一定影响。根据水量平衡法可得到 $ET_a$ :

$$ET_a = P_i + I_i + \Delta W + W_{\text{地下水补给}} - W_{\text{径流损失}} - W_{\text{深层渗漏量}} \quad (2)$$

其中:

$$I_i = \alpha \cdot p \quad (3)$$

式中: $\Delta W$ 为计算时段初末的土壤储水量,mm,由于关中灌区土壤储水变化量很小,因此忽略 $\Delta W$ 变化,即 $\Delta W = 0$ ; $W_{\text{地下水补给}}$ 为地下水补给量,mm,当地下水位小于3 m时,才能被农作物有效利用,本文的研究区域为宝鸡峡灌区,该灌区大部分区域地下水位埋深大于3 m,因此本文在计算时,不考虑地下水补给量,即 $W_{\text{地下水补给}} = 0$ ; $W_{\text{深层渗漏量}}$ 为深层渗漏量,mm; $W_{\text{径流损失}}$ 为径流损失量,mm,宝鸡峡灌区属于西北半干旱地区, $W_{\text{深层渗漏量}}$ 、 $W_{\text{径流损失}}$ 可忽略不计。 $I_i$ 为有效降雨量,mm; $P_i$ 为灌溉水量,mm; $\alpha$ 为有效降雨利用系数; $p$ 为研究区域降雨量。根据关中灌区实际情况分析可知, $ET_a$ 可由不同阶段作物实际供水量代替,实际供水量主要指有效降雨量 $I_i$ 和灌溉水量 $P_i$ 。

为便于计算,  $ET_m$  可由作物生长不同阶段需水量  $Q_i$  代替。根据需水量和灌溉引水量, Jensen 公式可简化表示为:

$$\frac{y_a}{y_m} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{P_i + I_i}{Q_i} \right)^{\lambda_i} \quad (4)$$

作物敏感系数  $\lambda_i > 0$ ,  $\lambda_i$  越大说明此阶段作物对水分越敏感, 作物受水分胁迫的影响越大, 此时  $y_a/y_m$  越小, 作物实际产量  $y_a$  就越小。

### 3.1.3 河道生态基流保障引起的农业损失计算

根据不考虑生态基流保障时作物的实际产量, 减去作物在受到水量影响后的实际产量, 即可得到单位面积作物产量损失, 可表示为:

$$Y_{\text{损失}} = y_{\text{原产量}} - y_a \quad (5)$$

式中:  $Y_{\text{损失}}$  为农作物产量损失,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ;  $y_{\text{原产量}}$  为未考虑生态基流保障时作物的实际产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

根据作物收购价格与作物损失量, 即可得到单位面积作物产值损失, 可表示为:

$$V_{\text{直接}} = P \cdot Y_{\text{损失}} \quad (6)$$

式中:  $V_{\text{直接}}$  为单位面积作物产值损失,  $\text{元}/\text{hm}^2$ ;  $P$  为作物收购价格,  $\text{元}/\text{kg}$ 。

### 3.2 河道生态基流保障率计算方法

河道生态基流保障率是衡量河道生态基流保障情况的重要尺度, 将一年中河道流量满足目标调控值的天数除以一年总天数, 即得到河道生态基流保障率, 可表示为:

$$P_j = \frac{D_j}{365} = \frac{\sum_{i=1}^{365} \text{sgn}(Q_{\text{实}} - Q_{\text{基}})}{365} \times 100\% \quad (7)$$

其中:  $\text{sgn}(Q_{\text{实}} - Q_{\text{基}}) = \begin{cases} 1 & (Q_{\text{实}} \geq Q_{\text{基}}) \\ 0 & (Q_{\text{实}} < Q_{\text{基}}) \end{cases}$

式中:  $P_j$  为河道生态基流保障率, %;  $D_j$  为一年中河道流量可达到调控值要求的天数;  $Q_{\text{实}}$  为河道的实际日流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\text{基}}$  为生态基流目标调控值,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 3.3 数据来源

数据主要来源于 1960 - 2016 年《中华人民共和国水文年鉴》, 2004《陕西省水利统计年鉴》、2011 年《陕西省水利年鉴》<sup>[22-24]</sup> 和《陕西省统计年鉴 1981》《陕西省统计年鉴 2011》<sup>[25-27]</sup> 《陕西省统计年鉴 2004》。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 农业损失计算

陕西省渭河流域管理局将渭河林家村断面阶段的生态基流保障值定为  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此, 将  $5 \text{ m}^3/\text{s}$

作为渭河宝鸡段林家村断面生态基流低限调控值。《渭河流域重点治理规划》对渭河关中段林家村断面生态基流调控值定为  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , 因此将  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  作为渭河林家村断面生态基流高限调控值。本文将依次计算生态基流调控值在  $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$  之间的农业损失量。

为了更好地研究不同来水频率下保障生态基流造成的农业损失量, 根据河道天然来水情况选取典型年加以分析。由于渭河属于季节性河流, 在非汛期河道生态基流短缺现象严重, 因此本文根据林家村(合)站 1960 - 2016 年非汛期平均径流量资料选取典型水文年, 选取结果如表 1 所示。

表 1 典型水文年选取结果

来水频率/%	年份	年型
50	1981	平水年
75	2004	枯水年
90	2011	特枯年

作物敏感系数  $\lambda_i$  一般通过实验确定, 作物需水量可通过彭曼公式计算得到。受资料限制, 本文作物敏感系数直接参考肖俊夫等<sup>[28]</sup> 对西北地区作物敏感系数已有的研究成果, 作物需水量采用王超等<sup>[29]</sup> 对关中灌区作物需水量的研究成果, 选取各月的作物需水量的多年平均值。

结合宝鸡峡灌区实际情况, 灌区以粮食作物为主, 粮食作物种植面积接近总种植面积的 90%, 冬小麦和夏玉米是宝鸡峡灌区最主要的两种粮食作物。冬小麦和夏玉米各生长阶段内的相关参数如表 2 和 3 所示。其中, 冬小麦在不受水分影响时的最优单产量为  $6306 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 夏玉米在不受水分影响时的最优单产量为  $7731 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

农作物生育期内降水有效利用系数需通过实验获得, 本文参考陕西省水利厅和西北农林科技大学 1991 年利用多年观测试验计算统计的降水有效利用系数结果, 如表 4 所示。

表 2 西北地区冬小麦各生长阶段相关参数

时间	生长阶段	$\lambda_i$	$Q_i/\text{mm}$
10 月中旬	苗期	0.100	92.92
1 月	越冬	0.088	21.05
2 月	返青	0.123	18.98
3 - 4 月	拔节	0.142	71.32
5 月	抽穗	0.192	240.71
6 月上旬	成熟	0.177	38.70

表3 西北地区夏玉米各生长阶段相关参数

时间	生长阶段	$\lambda_i$	$Q_i/\text{mm}$
6月下旬-7月中旬	苗期	0.106	86.40
7月下旬-8月上旬	拔节	0.167	137.55
8月中旬-9月上旬	抽雄	0.261	150.00
9月中旬-9月下旬	成熟	0.246	50.55

表4 宝鸡峡灌区冬小麦和夏玉米生育期内不同降水量的有效利用系数

降水量/mm	冬小麦	夏玉米
0~100	1	1.00
100~200	1	1.00
200~300	1	0.99
300~400	1	0.95
400~500	1	0.88
500~600	1	0.78
600~700	1	0.63
>700	1	0.63

查阅《陕西省统计年鉴》可得到宝鸡峡灌区各典型年玉米生育期内降雨量,玉米生育期降雨量和需水量如图1。

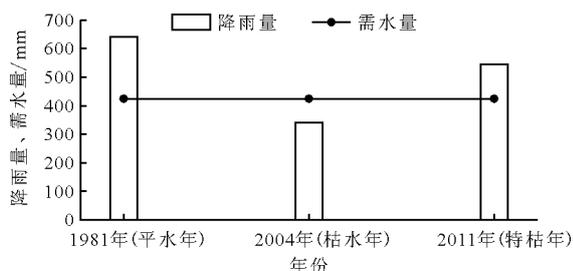


图1 各典型年玉米生育期降雨量与需水量

由图1可见,玉米生育期内降雨量较多,玉米生长需水基本可被满足,需要灌溉来补充的水量较少,所以在玉米生育期内(6-9月)减少灌溉水量对玉米产量基本不会造成影响,因此本文的农业损失主要考虑冬小麦的产量损失。

查阅《陕西省水利年鉴》得到宝鸡峡灌区各个典型年小麦生育期内降雨量,由公式(3)及表4即可得到生育期内有效降雨量。根据生态基流调控值和林家村(合)站流量资料可得到宝鸡峡渠引水量,由于资料限制,以及近年来陕西省政府与陕西省渭河流域管理局提出了“先生态、再灌溉、后发电”的用水原则,本文不考虑魏家堡水电站引水(该电站引用宝鸡峡干渠弃水进行发电),近似认为宝鸡峡灌渠引水量即为宝鸡峡灌区灌溉引水量,由公式(4)即可得到保障生态

基流后,不同调控值下宝鸡峡灌区各典型年的单位面积实际产量,计算结果如表5所示。

表5 渭河林家村断面生态基流保障条件下的宝鸡峡灌区冬小麦单位面积实际产量  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 

基流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	平水年	枯水年	特枯年
5	4252.95	4152.04	3483.38
6	4194.61	4110.02	3401.28
7	4132.35	4067.02	3316.68
8	4069.36	4022.68	3229.01
9	3982.43	3961.82	3139.70
10	3899.24	3899.97	3050.39

根据宝鸡峡灌区实况及各典型年未考虑生态基流时的实际产量,由公式(5)即可得到林家村断面为保障生态基流不同调控值下造成的冬小麦单位面积损失量,计算结果如表6所示。

表6 渭河林家村断面生态基流保障造成的宝鸡峡灌区冬小麦单位面积产量损失  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 

基流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	平水年	枯水年	特枯年
5	247.06	707.96	1131.83
6	305.39	749.98	1213.92
7	367.65	792.98	1298.52
8	430.64	837.32	1386.19
9	517.57	898.18	1475.50
10	600.76	960.03	1564.81

宝鸡峡灌区的作物种植面积为  $18.86 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,由冬小麦单位面积损失和种植面积可得到其总产量损失,计算结果如表7所示。

表7 渭河林家村断面生态基流保障造成的宝鸡峡灌区冬小麦总产量损失  $10^8 \text{ kg}$ 

基流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	平水年	枯水年	特枯年
5	0.47	1.34	2.13
6	0.58	1.41	2.29
7	0.69	1.5	2.45
8	0.81	1.58	2.61
9	0.98	1.69	2.78
10	1.13	1.81	2.95

由表6和7可知,不同典型年冬小麦损失量差异较大,平水年单位面积损失量和总产量损失最小,特枯年单位面积损失量和总产量损失最大。这主要是由于特枯年河道天然来水量较小,为保障河道生态基流而减少的农业灌溉引水量较大,因此冬小麦产量损失也随之增大。同一典型水文年,随着生态

基流调控值的增大,冬小麦的单位面积产量损失和总产量损失也不断增大。其原因主要是天然来水量一定时,生态基流调控值越大,农业灌溉引水量越小,因此产量损失越大。

由表6、7得到的冬小麦的产量损失和国家发改委公布的2019年小麦最低收购价格2.24元/kg,根据公式(6)可得到冬小麦单位面积产值损失,进而得到灌区总损失值,如表8所示。

表8 渭河林家村断面生态基流保障造成的宝鸡峡灌区冬小麦产值损失

基流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	平水年		枯水年		特枯年	
	单位面积损失/ (元· $\text{hm}^{-2}$ )	总损失/ $10^8$ 元	单位面积损失/ (元· $\text{hm}^{-2}$ )	总损失/ $10^8$ 元	单位面积损失/ (元· $\text{hm}^{-2}$ )	总损失/ $10^8$ 元
5	553.40	1.04	1585.82	2.99	2535.29	4.78
6	684.06	1.29	1679.95	3.17	2719.18	5.13
7	823.55	1.55	1776.27	3.35	2908.69	5.49
8	964.63	1.82	1875.60	3.54	3105.07	5.86
9	1159.36	2.19	2011.92	3.79	3305.13	6.23
10	1345.69	2.54	2150.47	4.06	3505.19	6.61

由表8可知,同一典型水文年,随着生态基流调控值的增大,冬小麦单位面积产值损失和总产值损失不断增大。随着各典型年丰枯变化,产值损失也发生变化,调控值相同时,平水年产值损失最小,特枯年产值损失最大。

成波等<sup>[15]</sup>通过作物需水系数法计算渭河宝鸡段生态基流调控值在 $6 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间时,宝鸡峡灌区农业产值损失在 $0.37 \times 10^8 \sim 5.25 \times 10^8$ 元之间。张倩等<sup>[16]</sup>采用水分生产函数计算了渭河生态基流保障后与未考虑基流保障时相比造成的灌区农业产值损失量在 $0.28 \times 10^8 \sim 9.88 \times 10^8$ 元之间。本文计算了河道生态基流调控值在 $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间时,典型年农业损失量在 $1.04 \times 10^8 \sim 6.61 \times 10^8$ 元之间,本文计算结果介于上述结果之间,因此农业经济损失结果具有一定的合理性。

#### 4.2 河道生态基流保障率计算

林家村水文站地处宝鸡峡灌区引渭灌溉渠首,林家村(三)站流量即为宝鸡峡渠引水后的河道流量,林家村(三)站流量数据直接反映了渭河干流宝鸡段引水后河道流量的变化。由林家村(三)站日流量资料,根据公式(7)可得到生态基流保障前后林家村断面的保障率,如表9所示。

由表9可知,不考虑生态基流保障时,大量的农业灌溉引水挤占河道生态用水,导致河道生态基流保障率较低,各个典型年不同调控值下生态基流保障率均低于40%,其中枯水年生态基流调控值为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的保障率仅有22%。保障前枯水年保障率低于特枯年保障率,主要原因是枯水年(2004年)宝

鸡峡渠引水量远大于特枯年(2011年),因此河道剩余水量远小于特枯年,从而导致河道生态基流量不足,保障率较低。生态基流保障后,农业灌溉引水量大量减少,保障率明显提高,其中平水年和枯水年不同调控值下保障率均大于96%,特枯年保障率也显著提高,均在76%以上。同一典型水文年生态基流调控值不同时,随着生态基流调控值的增大,保障程度逐渐降低。不同典型水文年生态基流调控值相同时,平水年保障程度最高,枯水年次之,特枯年保障程度最低。此计算结果也表明,在渭河宝鸡段实施生态基流保障措施效果显著,具有可行性。

表9 生态基流保障前后渭河林家村断面保障率 %

基流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	平水年		枯水年		特枯年	
	保障前	保障后	保障前	保障后	保障前	保障后
5	37	100	22	99	38	88
6	37	100	21	99	38	88
7	37	100	20	97	36	88
8	37	100	20	96	34	87
9	37	99	20	96	33	85
10	37	98	20	96	33	76

## 5 结论

(1)通过引进Jensen模型,定量计算了河道生态基流保障造成的农业产量损失和产值损失,该方法操作简单,易于应用。

(2)渭河林家村断面生态基流调控值在 $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间时,宝鸡峡灌区平水年农业产值损失在 $1.04 \times 10^8 \sim 2.54 \times 10^8$ 元之间,枯水年农业产值损

失在  $2.99 \times 10^8 \sim 4.06 \times 10^8$  元之间,特枯年农业产值损失在  $4.78 \times 10^8 \sim 6.61 \times 10^8$  元之间。

(3) 实施生态基流保障措施前后,河道保障率情况变化明显,生态基流保障效果显著。

(4) 基于河道生态基流保障的农业经济损失量的确定,能够为生态基流补偿提供依据,对流域地区有限水资源的利用、管理和规划提供支持。

本文在计算农业损失量时,仅考虑了冬小麦的损失,相应的河道生态基流保障造成的农业产量与产值损失,与实际可能存在一定偏差,因此,还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 刘丹,邢琼琼,郭欣欣,等. 基于生态水力半径法的贾鲁河生态需水量计算[J]. 水资源与水工程学报, 2018,29(1):105-110.
- [2] 李冰瑶,陈星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(6):104-108.
- [3] LOOMIS J, KENT P, STRANGE L, et al. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: results from a contingent valuation survey[J]. Ecological Economics, 2004,33(1):103-117.
- [4] 李美香,周向华,王启明,等. 基于改进突变级数法的秦淮河河流健康评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(6):39-43.
- [5] CAIOLA N, IBÁÑEZ C, VERDÚ J, et al. Effects of flow regulation on the establishment of alien fish species: A community structure approach to biological validation of environmental flows [J]. Ecological Indicators, 2014, 45(5):598-604.
- [6] CHEN He, ZHAO Yanwei. Evaluating the environmental flows of China's Wolonghu wetland and land use changes using a hydrological model, a water balance model, and remote sensing[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 253-260.
- [7] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报, 2002,33(9):14-19.
- [8] 王亚平,范世香,高雁,等. 基于区域水生态安全的水量干涉限探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(6):67-71+78.
- [9] 高凡,黄强,张洪波. 基于河道生态基流保障的渭河宝鸡段水资源调控研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012,26(6):149-154.
- [10] 李怀恩,岳思羽. 河道生态基流的功能及价值研究——以渭河宝鸡段为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11):64-73.
- [11] QURESHI M E, CONNOR J, KIRBY M, et al. Economic assessment of acquiring water for environmental flows in the Murray Basin[J]. Australian Journal of Agricultural & Resource Economics, 2010,51(3):283-303.
- [12] JONES R, CREAM J, ALUWIHARE P, et al. Economic cost of environmental flows in an unregulated river system [J]. Australian Journal of Agricultural & Resource Economics, 2010,51(3):305-321.
- [13] SISTO N P. Environmental flows for rivers and economic compensation for irrigators[J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(2):1236-1240.
- [14] XUE Jie, GUI Dongwei, LEI Jiaqiang, et al. A hybrid bayesian network approach for trade-offs between environmental flows and agricultural water using dynamic discretization [J]. Advances in Water Resources, 2017, 110:445-458.
- [15] 成波,李怀恩. 基于河道生态基流保障的农业生态补偿量研究[J]. 自然资源学报, 2017,32(12):2055-2066.
- [16] 张倩,李怀恩. 渭河关中段生态基流保障对灌区的影响及补偿研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(6):227-231.
- [17] 李层. 流域污染负荷计算方法的比较研究——以渭河流域为例[D]. 西安:西安理工大学, 2014.
- [18] 李晓春. 渭河干流宝鸡段生态水量调度探讨[J]. 陕西水利, 2015(2):9-11.
- [19] 周维博,李佩成. 干旱半干旱地域灌区水资源综合效益评价体系研究[J]. 自然资源学报, 2003,18(3):88-293.
- [20] 王蕊莲. 宝鸡峡灌区灌溉用水量与降水量的相关分析[J]. 防渗技术, 2001,7(3):42-46+48.
- [21] 胡孝利. 陕西省九大灌区信息化系统设计[D]. 西安:西安理工大学, 2003.
- [22] 陕西省水利厅. 1981年陕西省水利统计年鉴[M]. 西安:陕西科学出版社, 1982.
- [23] 陕西省水利厅. 2004年陕西省水利统计年鉴[M]. 西安:陕西科学出版社, 2005.
- [24] 陕西省水利厅. 2011年陕西省水利统计年鉴[M]. 西安:陕西科学出版社, 2012.
- [25] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴 1981[M]. 北京:中国统计出版社, 1982.
- [26] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴 2004[M]. 北京:中国统计出版社, 2005.
- [27] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴 2011[M]. 北京:中国统计出版社, 2012.
- [28] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等. 中国主要农作物分生育期 Jensen 模型研究[J]. 节水灌溉, 2008(7):1-3+8.
- [29] 王超,牛文全. 关中灌区需水与用水影响因素及变化趋势分析[J]. 灌溉排水学报, 2014,33(3):17-21.