

基于生态安全的阿瓦提灌区生态需水量研究

郭玉丹, 何英, 彭亮

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 阿瓦提灌区地处塔里木盆地西北边缘, 气候极端干旱, 降水稀少, 蒸发强烈。近年来, 由于大批开荒、水资源不合理利用、土壤盐渍化等导致灌区生态环境越发脆弱, 阻碍其经济的可持续发展。在灌区实地考察、分析整理多年新疆统计资料的基础上, 考虑灌区生态用水安全, 针对不同植被生态需水特点, 分别采用彭曼公式法、定额法和比值法等相适宜的生态需水研究方法, 计算其生态需水量。结果表明: 阿瓦提灌区生态需水总量为 $13.37 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中, 河道外生态需水量为 $6.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河道内生态需水量为 $6.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。通过生态需水量研究, 提出适宜的用水建议, 为阿瓦提灌区生态系统的健康与稳定提供一定的理论依据。

关键词: 生态安全; 生态需水量; 生态系统; 阿瓦提灌区

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0241-06

Study on ecological water demand in Awati Irrigation Area based on ecological security

GUO Yudan, HE Ying, PENG Liang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The Awati Irrigation District is located on the northwestern edge of the Tarim Basin. The climate is extremely arid with low precipitation and strong evaporation. In recent years, due to a large number of land reclamation, irrational use of water resources, and soil salinization, the ecological environment in irrigated areas become increasingly fragile and hindered its sustainable economic development. Based on the field investigation and analysis of Xinjiang's statistical data of many years, this paper considers the ecological water safety of irrigation districts, and adopts the appropriate ecological water requirements such as Penman formula, quota method and ratio method for different vegetation ecological water demand characteristics to calculate its ecological water demand. The results showed that the total ecological water demand in the Awati Irrigation Area is $13.37 \times 10^8 \text{ m}^3$, of which the ecological water requirement outside the river is $6.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the ecological water requirement in the river is $6.57 \times 10^8 \text{ m}^3$. Through the ecological water demand studies, the water use recommendations are proposed to provide a theoretical basis for the health and stability of the Awati irrigation area ecosystem.

Key words: ecological security; ecological water demand; the ecological system; Awati Irrigation District

1 研究背景

近几十年来, 由于人类活动强度的不断加强, 对水的需求量也随之增加, 使得灌区水资源供需矛盾更加突出, 在水与生态环境方面表现出来的主要问题有: 农业用水量持续增加, 导致土壤饱和度降低,

出现盐碱化; 生态用水得不到保障, 土壤沙化, 植被枯萎; 灌溉面积持续增加, 供需平衡关系矛盾更加突出, 水资源季节分布尤为不均衡; 大量开采地下水, 加重了生态环境的恶化。为降低生态环境的破坏和地下水减少等现象的发生, 相关学者已展开大量研究^[1]。根据不同植被生态需水特点, 探索计算

收稿日期: 2018-05-25; 修回日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51569031)

作者简介: 郭玉丹(1990-), 女, 河南鹤壁人, 在读研究生, 研究方向干旱区水资源高效利用与管理。

通讯作者: 何英(1982-), 女, 四川涪陵人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事内陆干旱区水文过程和水资源利用的教学研究工作。

生态需水量,确定适宜的灌区规模并提出用水建议,为维护灌区的生态环境及绿洲生态,合理配置有限的水资源具有一定的理论意义^[2]。

翻阅国内外相关资料,对生态需水的研究有很多种。在20世纪80年代末,最早提出了“生态用水”的问题^[3]。在初步研究中,针对河流的生态需水量,提出河流流量的相关一些概念,这些概念虽然没有表现出完整性的生态系统,但却初步展现出生态环境需水的含义^[4]。之后,国内外的研究热点在生态需水研究上^[5]。对于生态环境,人们的意识不断加强,不少国家更加重视生态环境需水,尤其是一些欧美发达国家^[6]。

国外生态需水研究主要围绕在河流生态环境需水等方面,前期的研究出发点主要集中在河道枯季流量的研究^[7]。D. Louw(2010年)在估算河流环境需水量上,结合水文、水力学和生态三部分,并在南非推广^[8];Everaert等^[9](2013年)以相关模型为基础,研究欧洲的生态和管理方面;Shiulee Chakraborty等^[10](2013年)在研究不同的气候条件下与作物蒸散量和农业的关系,得出农业需水量随气象的变化而变化;Curtis等^[11](2014年)通过模型证明了作物需水随温度的升高及降水量的增加而增加。

阿瓦提灌区是自治区粮棉重要产区之一,也是全国重要的优良棉生产基地,农业用水主要由老大河流经阿瓦提县第一分水闸向阿瓦提灌区输水。2016年,阿瓦提县总灌溉面积为 $11.23 \times 10^4 \text{ hm}^2$,较14年前灌溉面积增加了 $3.29 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。面对有限的水资源,灌溉面积的不断扩大导致农业用水挤占生态用水,使得生态环境越发脆弱。为保障生态环境的可持续发展,开展基于生态安全的阿瓦提灌区生态需水研究具有现实意义。

2 研究区概况

阿瓦提县是阿克苏地区面积较大的一个县,地理坐标北纬 $39^{\circ}31' \sim 40^{\circ}50'$,东经 $79^{\circ}45' \sim 81^{\circ}05'$ 。阿瓦提县辖一镇、七乡、三个农场,含有四大灌区,分别是拜什艾日克灌区、玉满灌区、丰收灌区和英艾日克灌区,灌区位置分布示意图见图1。

阿瓦提县多年平均降水量为47.8 mm,多年平均蒸发量1 162.2 mm,为降水量的24倍,多年平均气温 10.4°C ,无霜期 192.6 d ^[12],日数由平原向山区递减。灌区通过阿克苏老大河引水,流经阿瓦提县最后汇入新大河,与叶尔羌河及和田河相汇后向东

泄入塔里木河,全长40 km。

根据《阿瓦提县地下水开发建设实施方案》,阿瓦提灌区2016年地下水补给资源总量为 $3.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水可开采量为 $1.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据《关于阿克苏地区各县市及兵团第一师实行最严格水资源管理制度落实“三条红线”控制指标的复核意见》新水函(2015)10号文件规定,阿克苏地区阿瓦提县“三条红线”用水量控制指标见表1。

表1 阿克苏地区阿瓦提县“三条红线”用水量控制指标表

水平年	用水量控制指标表 10^8 m^3			
	工业用水量 合计	农业用水量 合计	居民生活 用水量合计	总用水量 合计
2015年	0.0200	8.8990	0.1116	9.0306
2020年	0.0416	8.8583	0.1261	9.0260
2030年	0.0775	8.9419	0.1211	9.1406

阿瓦提灌区是新疆典型的以粮棉为主导的地区,2016年阿瓦提县耕地面积为 $9.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$,农作物播种面积 $8.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中粮食占22.36%,棉花占74.92%,其它作物占2.72%。

水文气象数据:收集阿瓦提灌区2000-2017年逐日的水文气象资料(包括风速、气温、湿度和降水数据),数据来源于中国气象网站。

水文地质参数:水文地质参数来自新疆阿克苏市阿瓦提县灌区农业供水水文地质勘查报告。

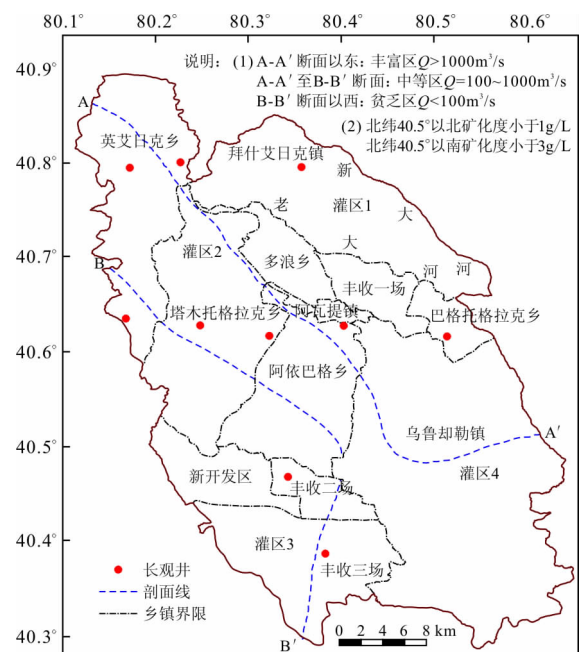


图1 阿瓦提灌区地理位置分布示意图

3 灌区生态需水量的研究方法

3.1 有效降水量的计算

有效降水量是计算生态需水量的基础,参考徐小波等^[13]在南疆的有效降水量计算方法得出阿瓦提县灌区的有效降水量 P_0 。

$$P_0 = P \cdot q \quad (1)$$

式中: P_0 为有效降水量; P 为降水量; q 为降水有效利用系数(南疆取 0.55)。

3.2 彭曼公式法

Penman - Monteith 法,是通用的计算植被需水量的基本方法。天然林地和人工植被生态需水量采用彭曼公式法。

根据 Penman - Monteith 公式计算阿瓦提灌区的参考作物蒸散量,计算公式如(2)、(3)、(4)所示:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; Δ 为饱和水汽压随温度的变化率, kPa/°C; R_n 为净辐射, MJ/(m² · d); G 为土壤热通量, MJ/(m² · d); r 为湿度表常数 kPa/°C; U_2 为 2 m 高处的平均风速, m/s。

$$R_n = 0.25 \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a - 2.45 \times 10^{-9} (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \cdot (0.34 - 0.14 \sqrt{e_d}) [(T_{\max} + 273)^4 + (T_{\min} + 273)^4] \quad (3)$$

$$G = \begin{cases} 0.38(T_i - T_{i-1}) & \text{计算第 } i \text{ 日 } ET_0 \text{ 时用} \\ 0.14(T_n - T_{n-1}) & \text{计算第 } n \text{ 日 } ET_0 \text{ 时用} \end{cases} \quad (4)$$

式中: a, b 为经验系数,各地州取值见表 2 所示; n 为实际日照时数, h/d; N 为最大可能日照时数, h/d; R_a 为地面上空大气层顶接收的太阳辐射能, MJ/(m² · d); T_{\max} 为日(时段)最高气温, °C; T_{\min} 为日(时段)最低气温, °C; T_i, T_{i-1} 分别为第 i 天、第 $i-1$ 天的平均气温, °C; T_n, T_{n-1} 分别为第 n 月、第 $n-1$ 月的平均气温, °C。

表 2 新疆各地实测 a, b 值

项目	若羌	阿勒泰	伊犁	乌鲁木齐	哈密	吐鲁番	喀什	库车	和田
a	0.10	0.38	0.38	0.20	0.09	0.16	0.25	0.16	0.28
b	0.65	0.34	0.33	0.56	0.73	0.67	0.50	0.50	0.57

注:数据来源:《新疆地下水研究》^[14]和《新疆农业大学学报》^[15]。

3.3 定额法

草地生态需水量和河流水面蒸发需水量用面积定额法进行计算,即需水定额(年蒸发量)乘以面积。计算公式如(5)所示:

$$W = \sum W_i = \sum (A_i \cdot r_i) = A \cdot E \quad (5)$$

式中: A_i 为作物 i 的种植面积(A 为河流水面的面积 10⁴ hm²); r_i 为该作物的净生态需水定额(E 表示流域年蒸发量 mm)。

3.4 Tennant 法

河道基本生态需水量用蒙大拿法计算。其中将生态最小需水量定义为该流域年平均径流量的 10% ~ 15%;生态最佳需水量定义为该流域年平均径流量的 60% ~ 100%;最大生态需水量定义为该流域年径流量的 200%。

3.5 比值法

河流输沙需水量采用比值法,其计算公式如(6)所示:

$$W_s = \frac{S_t}{C_{\max}} \quad (6)$$

式中: W_s 为河流输沙需水量, 10⁸ m³; S_t 为年平均输沙量, 10⁴ t; C_{\max} 为年最大月含沙量的平均值, kg/m³。

3.6 达西定律

河流渗漏需水量采用达西定律,其计算公式如(7)所示。

$$W = 2K \cdot I \cdot L \cdot H \cdot T \quad (7)$$

式中: W 为河道渗漏需水量, 10⁸ m³; K 为渗透系数, m/d; I 为水力坡度, %; L 为河道长度, m; H 为含水层厚度, m; T 为时间, d。

4 结果与讨论

4.1 有效降水量

从表 3 可以看出,阿瓦提灌区的降水量主要集中在 5、6、7 和 8 月份,7 月份的降水量最多,1、2、11 和 12 月降水量偏少,12 月的降水量最少。由公式(1)和表 3 的数据计算出阿瓦提灌区多年有效降水量为 26.3 mm。

表3 阿瓦提县历年各月平均降水量统计表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
降水量	0.7	0.9	2	1.8	6	7.8	10.4	10.3	5	1.7	0.7	0.5	47.8

4.2 河道外生态需水量

河道外生态需水量是指为保障生态平衡,河道外生态所需要的基本水量。对于生态系统来说,陆地植被的需水规律是生态需水研究的基础^[16]。

从图2阿瓦提灌区2000-2017年多年平均月蒸发量和降水量可以看出,多年平均降水量1-5月呈上升趋势,5-7月基本趋于稳定,从7月以后逐步下降,7月的降水量最大,12月的降水量最小。多年平均蒸发量变化较稳定,7月的蒸发量最大,12月的蒸发量最小。降水少,导致空气湿度小,从而多年平均蒸发量大于降水量。

从图3阿瓦提县2000-2017年平均蒸散量可以看出,多年平均蒸散量1675.1mm,最大值2254.8mm。

出现在2013年,最小值1121.3mm,出现在2000年。多年蒸散量呈现上升的趋势,在2003-2007年增长速度较快,之后呈现稳步增长,2014年以后趋于稳定状态。这是由于全球气候变暖,温度上升,降雨量少,导致太阳辐射变大,从而蒸散量增加。根据阿瓦提灌区蒸散量的最大值、最小值和平均值,选用阿瓦提灌区2016年作为基期年,其参考作物蒸散量为2238.6mm。

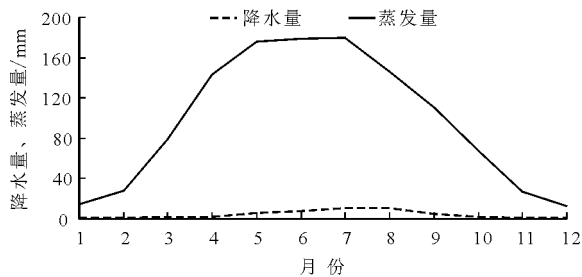


图2 阿瓦提灌区多年平均月蒸发量和降水量变化图

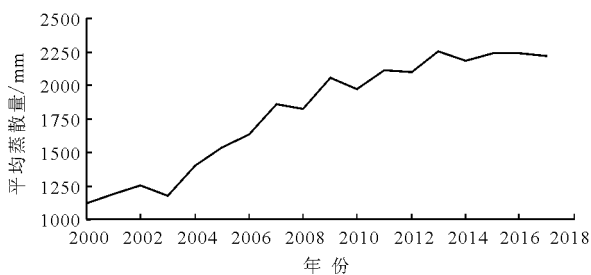


图3 阿瓦提灌区2000-2017年平均蒸散量变化图

4.2.1 天然植被生态需水量估算

(1)天然林地的生态需水量估算。天然林地的生态需水量采用彭曼公式法。天然林地在陆地生态系统和生态系统演变与发展过程中发挥着重要的作用。根据相关资料^[17]得出灌区天然灌木林地的生态需水系数为0.29,2016年灌木林地的面积 $16 \times 10^4 \text{ hm}^2$,有效降水量为26.3mm,灌木林地的生态需水定额为2081.9mm,净生态需水定额为2055.6mm,根据土壤水修正系数0.38,得出阿瓦提灌区2016年天然林地生态需水量 $1.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。天然林地的生态需水量计算表见表4。

表4 天然林地的生态需水量计算表

生态需水量/mm	有效降水量/mm	净生态需水量/mm	面积/ 10^4 hm^2	年均生态需水量/ 10^8 m^3
474.78	26.29	2055.6	16	1.25

(2)草地生态需水量估算。草地的生态需水量采用定额法计算。已知参考作物蒸散量2238.6mm,草地生态需水系数0.22,草地的生态需水定额492.5mm,草地的净生态需水定额466.2mm。草地的面积 $6.37 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 及土壤修正系数(0.38),由公式3得出阿瓦提灌区2016年草地的生态需水量为 $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。草地的生态需水量计算表见表5。

表5 草地的生态需水量计算表

生态需水量/mm	有效降水量/mm	净生态需水量/mm	面积/ 10^4 hm^2	年均生态需水量/ 10^8 m^3
492.5	26.3	466.2	6.37	1.13

4.2.2 人工植被生态需水量估算

(1)农田防护林生态需水量估算。农田防护林生态需水量采用彭曼公式法计算。农田防护林是为改善小气候保证作物稳产而营造的防护林。参考作物蒸散量为2238.6mm,防护林的生态需水系数为0.93,土壤水分修正系数取0.37,有效降水量为26.3mm,农田防护林的需水定额1522.6mm,净需水定额1496.3mm,农田防护林面积为 $0.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。计算得出阿瓦提灌区2016年农田防护林的生态需水量为 $0.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。农田防护林生态需水量计算表见表6。

表 6 农田防护林生态需水量计算表

生态需水量/mm	有效降水量/mm	净生态需水量/mm	面积/ 10 ⁴ hm ²	年均生态需水量/10 ⁸ m ³
1522.6	26.3	1496.3	0.5	0.03

(2)作物生态需水量估算。作物生态需水量采用彭曼公式法计算。作物生态需水量是指作物经过正常生长发育,获得高产量植株体所需要的水量之和。目前阿瓦提县灌区作物主要包括粮食作物和经济作物,粮食作物为冬小麦、玉米和复播玉米,经济作物为棉花(常规灌)、棉花(滴灌)和其他经作物。根据资料,作物生态需水量计算表见表 7,由表 7 可以看出,作物总生态需水量为 $4.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,棉花的生态需水量最大,为 $3.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,这是因为阿瓦提灌区种植作物主要以棉花为主;其他经作物的生态需水量最小,为 $0.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。综合以上计算结果得出阿瓦提灌区 2016 年河道外生态需水量为 $6.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。计算结果见表 8。各生态需水量所占比重见图 4。由图 4 可知,作物生态需水量占的比例最大,农田防护林生态需水量占的比例最小。

表 7 阿瓦提县各种作物生态需水量计算表

作物种类	耕作面积/ 10 ⁴ hm ²	净生态需水定额/mm	生态需水量/ 10 ⁸ m ³
小麦	0.91	505.5	0.46
玉米	0.33	484.8	0.16
复播玉米	0.75	320.0	0.24
棉花(常规灌)	2.47	542.5	1.34
棉花(滴灌)	4.18	495.2	2.07
其他经作物	0.26	461.5	0.12

注:作物需水定额和种植面积数据来源于阿克苏地区阿瓦提县农田水利规划现状调查报告

表 8 阿瓦提灌区河道外生态需水量 10⁸ m³

天然林地生态需水量	草地生态需水量	农田防护林生态需水量	作物生态需水量	河道外生态需水量
1.25	1.13	0.03	4.39	6.8

4.3 河道内生态需水量

河道内生态需水量主要是保证河流输沙和河流渗漏所需要的水量。

4.3.1 河道基本生态需水量估算 河道基本生态需水量是指维持河道最基本的生态水量平衡,且保

证下游不受到威胁所要求的水量。阿瓦提灌区的地表水资源主要由老大河提供,经过实测资料分析得出,老大河多年平均径流量为 $26.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中给阿瓦提灌区限额配水量为 $8.62 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。采用蒙大拿法计算得出,阿瓦提灌区 2016 年的基本生态需水量为 $0.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。阿瓦提灌区河流生态需水量计算表见表 9。

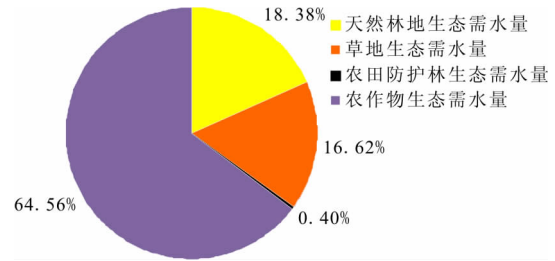


图 4 阿瓦提灌区河道外各生态需水量比例

表 9 阿瓦提灌区河流生态需水量计算表 10⁸ m³

百分比/%	10	15	60	100	200
生态需水量	0.86	1.29	5.17	8.82	17.24

4.3.2 河流输沙需水量 对于西北地区来说,大多数河流具有干旱少雨的特点,致使河流泥沙问题表现的更加突出。过量泥沙问题导致水平面上升,甚至会出现地上河的危险。根据老大河水文站 1958-1965、1981-1984 年共 12 a 完整的泥沙测验资料统计,阿瓦提灌区多年平均输沙量为 $169.34 \times 10^4 \text{ t}$,多年最大月含沙量的平均值为 4.06 kg/m^3 ,采用比值法,由公式(4)得出阿瓦提灌区 2016 年河流输沙需水量 $4.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。阿克苏河是多泥沙性河流,泥沙主要来源有:上游山区冰雪融水夹带的冰碛物;河道两岸地表裸露,山岩石随冰雪融水和雨水冲刷下来的风化物,导致河流输沙需水量增大。河流输沙需水量计算表见表 10。

表 10 河流输沙需水量计算表

多年平均输沙量/ 10 ⁴ t	多年最大月 含沙量/(kg·m ⁻³)	河流输沙 需水量/10 ⁸ m ³
169.34	4.06	4.17

4.3.3 河流水面蒸发需水量 由图 2 可知,降水量远远小于蒸发量。所以对于西北地区来说,河流水面蒸发不容忽视。阿瓦提灌区年蒸发量为 1 162.2 mm,河流水面的面积 $0.45 \times 10^8 \text{ m}^2$,由定额法得出阿瓦提灌区的水面蒸发需水量为 $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据锥天峰等^[18]的资料,动水比静水水面状态下多蒸

发12%~38%,取25%。计算得出阿瓦提灌区2016年水面蒸发需水量为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。河流水面蒸发需水量见表11。

表11 河流水面蒸发需水量计算表

多年蒸发量/mm	河流水面面积/ 10^8 m^2	水面蒸发量/ 10^8 m^3
1162.2	0.45	0.65

4.3.4 河流渗漏需水量 由于岩石的空隙、断层等原因向地下渗漏的水量为渗漏水量。阿瓦提灌区渗漏需水占阿瓦提灌区河道内生态需水重要一部分,采用达西公式(公式7)计算河流渗漏需水量。其中,渗漏系数 K 取3, I 取0.57%,河道长度 L 取 $0.75 \times 10^5 \text{ m}$,含水层厚度 H 取98 m,时间 T 取365 d,得出河流渗漏需水量 $0.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

综合以上结果,得出阿瓦提灌区2016年河道内生态需水量为 $6.57 \times 10^8 \text{ m}^3$,见表12,各生态需水量所占比重见图5。由图5可知,河流输沙需水量所占的比重最大,为63.47%,这是由于老大河是多沙性河流,含沙量大;阿瓦提灌区实行限额配水,没有多余水量进行排砂,导致渠系淤积严重。

表12 阿瓦提灌区河道内生态需水量 10^8 m^3

河道基本生态需水量	河流输沙需水量	河流水面蒸发需水量	河流渗漏需水量	河道内生态需水量
0.86	4.17	0.65	0.89	6.57

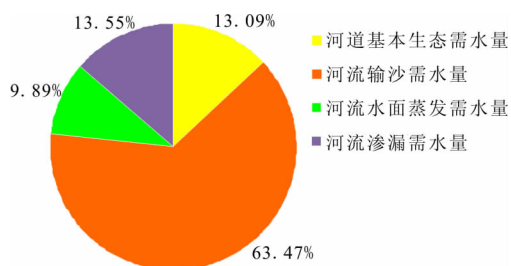


图5 阿瓦提灌区河道内各生态需水量比例

4.4 建议

通过本次研究,提出以下建议:

(1)在农业用水方面,严格控制用水总量,适当压减灌溉面积,农田作物上多推广滴灌等节水措施,适当调整作物种植结构,增加耗水量小的农作物类型。

(2)在工程建设方面,对引水枢纽进行优化,提出骨干渠道有效排沙措施,减少渠道泥沙淤积,提高工程的使用寿命和运行效率,保障渠道正常输水和高效节水技术应用。

(3)在生态湿地恢复与保护方面,利用艾西曼湖拦蓄洪水和灌溉弃水,恢复艾西曼湖生态湿地功能,同时兼顾蓄余补缺,调节水量,缓解春旱,沉蓄泥沙的作用。

5 结论

在分析整理大量资料的前提下,针对不同植被生态需水特点,采用与之相适宜的生态需水研究方法对阿瓦提灌区生态需水进行计算,研究结果表明:阿瓦提灌区2016年生态需水总量为 $13.37 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中河道外生态需水量 $6.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,占需水总量的50.86%;河道内生态需水量 $6.57 \times 10^8 \text{ m}^3$,占需水总量的49.14%。

通过阿瓦提灌区生态需水量研究,提出阿瓦提生态用水建议,为今后阿瓦提的水资源开发利用提供理论依据和技术支撑。研究过程中还存在以下问题:在计算参考作物蒸散量时,由于技术和人员的问题,地面上空大气层顶接收的太阳辐射能是通过公式计算而不是仪器测出,这给计算带来了误差,从而影响研究区的参考作物蒸散量。在今后的研究中,通过人员和技术的改进,可使参考作物蒸散量的计算更加准确。

参考文献:

- [1] 吴晓明,迟道才,李璐,等. 辽阳市生态需水量研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(1):106-109.
- [2] 韩宇平,阮本清,王富强. 宁夏引黄灌区适宜生态需水估算[J]. 水利学报, 2009, 40(6):716-723.
- [3] 汤奇成. 塔里木盆地水资源与绿洲建设[J]. 干旱区资源与环境, 1990, 4(3):110-116.
- [4] 崔真真,谭红武,杜强. 流域生态需水研究综述[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2010, 31(2):70-74+87.
- [5] 姜娜. 陕北黄土高原典型小流域生态需水研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
- [6] 张鑫. 区域生态环境需水量与水资源合理配置[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2004.
- [7] SMAKHITIN V U. Low flow hydrology: a review[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3-4):147-186.
- [8] HUGHES D A, LOUW D. Integrating hydrology, hydraulics and ecological response into a flexible approach to the determination of environmental water requirements for rivers[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(8):910-918.

(下转第253页)

- [12] 孙庆宇,佟玲,张宝忠,等. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在海河流域的适用性[J]. 农业工程学报,2010,26(11):68-72.
- [13] ASCE - EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation [R]. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. New York, USA: Technical Committee Report,2005.
- [14] ITENFISU D, ELLIOT R L, ALLEN R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as a part of the Drainage Engineering, ASCE,2003,129(6):440-448.
- [15] 苏春宏,陈亚新,徐冰. ET_0 计算公式的最新进展与普适性评估[J]. 水科学进展,2008,19(1):129-136.
- [16] 卢晓鹏,段顺琼,马显莹,等. 单双作物系数法计算玉米需水量的对比研究[J]. 节水灌溉,2012(11):18-21.
- [17] 吴慧蓉,崔远来,高明利. 作物系数影响因素分析[J]. 节水灌溉,2016(8):149-152+156.
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, HOWELL T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. Agricultural Water Management,2011,98(6):899-920.
- [19] 金菊良,侯志强,蒋尚明,等. 基于单作物系数和遗传算法的受旱胁迫下大豆蒸发蒸腾量估算[J]. 黑龙江大学工程学报,2017,8(1):1-10+12.
- [20] 强小嫚,蔡焕杰,孙景生,等. 陕西关中地区 ET_0 计算公式的适用性评价[J]. 农业工程学报,2012,28(20):121-127.
- [21] 苏春宏,陈亚新,张富仓,等. ET_0 计算公式在我国半干旱区的实验率定研究[J]. 人民长江,2009,40(21):91-95.
- [22] 徐俊增,彭世彰,张行南,等. 两种 Penman - Monteith 公式计算草坪草参考腾发量的适用性[J]. 农业工程学报,2009,25(12):32-37.
- [23] PEREIRA L S, ALLEN R G, SMITH M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future, Agricultural Water Management,2015,147:4-20.
- [24] 茆智,李远华,李会昌. 逐日作物需水量预测数学模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1995,28(3):253-259.

(上接第 246 页)

- [9] EVERAERT G, PAUWELS I S, BOETS P, et al. Model - based evaluation of ecological bank design and management in the scope of the European Water Framework Directive [J]. Ecological Engineering, 2013, 53:144-152.
- [10] CHAKRABORTY S, MISHRA S K, PANDEY R P, et al. Long - term changes of irrigation water requirement in the context of climatic variability[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 19(3):257-266.
- [11] CURTIS S, GAMBLE D W, POPKE J. Sensitivity of crop water need to 2071 - 95 projected temperature and precipitation changes in Jamaica[J]. Earth Interactions, 2014, 18(12):1-17.
- [12] 新疆农业大学. 新疆平原区大气降水、灌溉水、土壤水与地下水水量转化关系实验研究[M]. 石河子:新疆科技卫生出版社,2002.
- [13] 徐小波,周和平,王忠,等. 干旱灌区有效降雨量利用率研究[J]. 节水灌溉,2010(12):44-46+50.
- [14] 周金龙. 新疆地下水研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2010.
- [15] 周金龙,董新光,陈文娟,等. 应用彭曼 - 蒙特斯公式计算天山北坡平原区水面蒸发量[J]. 新疆农业大学学报,2002,25(4):35-38.
- [16] 廖轶群. 基于 GIS 的新疆地区植被生态需水量研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [17] 水利部国际合作司,水利部农村合作司,中国灌溉技术开发公司,水利部农田灌溉研究所编译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京,中国水利水电出版社,1998.
- [18] 雒天峰,李元红,王治军,等. 民勤红崖山灌区渠系水面蒸发量计算方法研究[J]. 人民黄河,2013,35(8):81-83+98.