

DOI: 10.5846/stxb201911092362

张爱民,郝天鹏,周和平,马占宝,崔师胜. 新疆白杨河流域特征及生态植被需水分析. 生态学报, 2021, 41(5): 1921-1930.

Zhang A M, Hao T P, Zhou H P, Ma Z B, Cui S S. Analysis on characteristics of Baiyang River Basin and water requirement of ecological vegetation in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1921-1930.

新疆白杨河流域特征及生态植被需水分析

张爱民¹, 郝天鹏¹, 周和平^{2,*}, 马占宝¹, 崔师胜³

1 新疆白杨河流域管理局, 乌鲁木齐 830000

2 新疆水利厅水利管理总站, 乌鲁木齐 830000

3 新疆白杨河流域管理局水利管理中心, 乌鲁木齐 830039

摘要:新疆白杨河流域地跨上游乌鲁木齐市达坂城及下游吐鲁番市托克逊县两个行政区,上游达坂城区位于天山博格达峰山前冲击、洪积山间盆地干旱区,源于天山多支源流汇集于盆地南端峡口,基于峡口形成下游并由有多支流沿程补给白杨河干流,穿越极端干旱戈壁荒漠区的托克逊县直至末端吐鲁番市境内尾间—艾丁湖,是我国典型少有的跨越干旱与极端干旱叠加型流域灌区,水资源有效利用及水生态环境保护具有重要作用。遵循流域各河流水系形成的自然生态环境属性及河道取水工程节点,采用 Penman-Monteith 法生态需水定额和卫星遥感面积识别及水文年内展布方法,分析评估流域内上下游绿洲生态环境植被需水量和河流生态基流及其调控断面。结果表明,上游达坂城区黑沟河年生态需水量、生态基流、年均径流占比和控制断面,分别为 921 万 m³、0.29 m³/s、18% 和黑沟渠首;阿克苏河为 1048 万 m³、0.33 m³/s、12% 和阿克苏渠首;高崖子河为 862 万 m³、0.27 m³/s、12% 和高崖子渠首;下游托克逊境内由白杨河干流调节,艾丁湖等生态需水量分别为 4256 万 m³、1.35 m³/s、32% 和小草湖渠首。白杨河流域年生态需水 7880 万 m³,生态基流 2.50 m³/s,生态水占年均径流量 17%,分析结果为流域生态环境管理保护提供依据。

关键词:白杨河流域;干旱极端干旱区;绿洲生态;需水分析

Analysis on characteristics of Baiyang River Basin and water requirement of ecological vegetation in Xinjiang

ZHANG Aimin¹, HAO Tianpeng¹, ZHOU Heping^{2,*}, MA Zhanbao¹, CUI Shisheng³

1 Xinjiang Baiyang River Basin Management Bureau, Urumqi 830000, China

2 Xinjiang Water Resources Department General Water Management Station, Urumqi 830000, China

3 Xinjiang Baiyang River Basin Management Bureau Water Conservancy Management Center, Urumqi 830039, China

Abstract: The Baiyang River Basin extends across two administrative districts including Dabancheng in the upper reaches of Urumqi city and Tuokesun County of Turpan City in the lower reaches, Xinjiang. The upper Dabancheng district is located in the dry area of alluvial and proluvial intermontane basin in front of Bogda peak of Tianshan Mountain. Many branches of source streams converge at the mouth of the southern end of the basin, and form the downstream from the gorge. Many tributaries supply the main stream of Baiyang River along the way. Baiyang River passes through Tuokesun County in the extremely arid Gobi desert and ends at Turpan City-Ayding Lake, one of the few typical irrigation areas in China which spans the superposition of drought and extreme drought. The effective utilization of water resources and protection of water ecological environment play an important role. According to the naturally ecological environment attributes formed by the river water system and the river water intake project nodes, Penman-Monteith ecological water demand quota, satellite

基金项目:新疆水利科技专项(YF2020-01)

收稿日期:2019-11-09; 网络出版日期:2021-01-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjslzhp@126.com

remote sensing area identification, and hydrological year distribution method were used to analyze and evaluate water demand of the ecological environment vegetation, river ecological base flow and its regulation sections in the upper and lower reaches of the basin. The results show that the annual ecological water demand, ecological base flow, annual runoff proportion, and control section of Heigou River in Dabancheng district are 921 thousand m^3 , 0.29 m^3/s , 18%, and Heigoutou section respectively; those of Aksu River are 1048 ten thousand m^3 , 0.33 m^3/s , 12%, and Aksu canal head; those of Gaoyazi River are 862 ten thousand m^3 , 0.27 m^3/s , 12%, and Gaoyazi channel head; and those of Ayding Lake are 4256 ten thousand m^3 , 1.35 m^3/s , 32%, and the head of Xiaocaohu, where the downstream Tuokesun is regulated by the main stream of Baiyang River. The annual ecological water demand of Baiyang River Basin is 7880 ten thousand m^3 , the ecological base flow is 2.50 m^3/s , and the ecological water accounts for 17% of the annual runoff. The results provide the basis for the management and protection of ecological environment in the basin.

Key Words: Baiyang River Basin; arid and extreme arid area; oasis ecology; water demand analysis

白杨河流域地处新疆天山东部,流域上游为天山博格达峰前山带乌鲁木齐市达坂城区,年均降水量 70mm,流域下游为天山之南的吐鲁番托克逊县,年均降水量不足 10mm,由此形成了流域内上游降水少、下游降水稀缺的干旱与极端干旱格局。流域水生态环境,上游由于天山博格达峰长年高山积雪冰川和降水作用,以及达坂城地处山间盆地及其水文地质土壤环境条件,具有较明显地表水地下水相互转换,多以河谷疏林灌丛草甸湿地绿洲生态植被群体;下游吐鲁番市托克逊县区域,位于流域下游降水稀少完全依赖河流补给地下水,下游周边及末端尾间艾丁湖,水生态环境植被多以骆驼刺荒漠化草地分布。特殊条件下水生态环境需水分析研究,对流域生态环境管理保护具有重要意义。生态环境植被需水研究,一般多采用卫星遥感、GIS 等 3S 技术^[1-2]结合 Penman-Monteith 法^[3-6],可以分析解决生态植被面积与生态需水关系,对于生态环境绿洲植被需水量计算时段,多以植被 4 至 10 月生长期考虑,但这样可能会忽略干旱区生态环境需水以河流下渗补给地下水特性。潜水蒸发法和面积定额法是计算植被生态需水常用方法^[7-10],有分析表明这两种方法比较结果相差 10% 较小。有学者^[11]建立干旱区植物生长与地下水位对数正态分布模型,计算生态需水量与其他方法比较相差也较小,表明不同方法分析结果差别不大可以选用。生态环境绿洲植被需水量占河道年径流量比重分析(生态需水基本流量),有历史流量法、水力定额法、栖息地法等多种分析方法,这些方法优缺点对比认为,传统水文学(Tennant)法较适合干旱区河道生态需水计算^[12-13],然而,此方法以年均径流量特定百分率计算河道水量存在一些不足,因此,有学者^[14-16]提出并应用河道基本生态需水年内展布法,体现年径流丰枯变化满足河流生态需求,采用这种方法,以东居延海为研究对象估算年均生态需水量,约占莺落峡水文测站年径流量 16.3%、14.6%、9.4%^[17];以汉江流域实证分析干支流控制断面最小下泄生态基流处于年均流量 15%—20%^[18];生态基流至少满足占年均径流量 10% 以上生态需求^[19];有学者以河流系统生态经济服务功能总经济价值最大值确定河流生态基流,并以此分析西北黄河最大支流渭河宝鸡段河流生态基流占径流 35.0%^[20]。由此可见,同一算法不同目标分析结果均有差异。

新疆白杨河流域地处干旱与极端干旱区,流域上游生态绿洲植被需水源于降水与河道径流沿程地下水共同补给作用,流域下游降水稀缺几乎为零,自然生态绿洲植被需水完全依靠河流补给地下水利用,考虑天然降水河道径流及地下水利用生态需水^[21-22]特征,本文以卫星遥感获取不同类型生态用水面积,采用 Penman-Monteith 和面积定额及河道水文年内展布法,分析白杨河流域天然灌丛荒漠植被生境需水量及河道时段生态基流,为流域生态需水评估及管理保护提供依据。

1 材料与方法

1.1 流域概况

白杨河流域水系发源于天山东部博格达峰南麓,形成“四源一干一湖”流域格局;上游为乌鲁木齐市达坂

城盆地,由黑沟河、阿克苏河、高崖子河三条源流,在达坂城盆地以南的峡口汇集形成了白杨河干流;以达坂城峡口汇集区为起点的白杨河干流全长约 150 km,向南走向沿途天然河道并有柯尔碱沟、阿拉沟等小支流汇入后,进入白杨河流域下游天山南部前山平原戈壁荒漠带,到此,由西向东南穿越吐鲁番市托克逊县城外 50 km 尾间,注入我国第一、世界第三低地,最低点高程-154.6 m 著名内陆咸水湖——艾丁湖,西南面库姆塔格沙漠(见图 1)。白杨河流域地跨两个行政区,上游乌鲁木齐市达坂城盆地干旱区,下游地处极端干旱区吐鲁番市托克逊县区域,流域地理坐标 88° 10′—89° 11′E,42° 29′—43° 48′N,东西最宽约 120 km,南北最长约 150 km,艾丁湖临湖河口以上流域总面积 5173.4 km²。

1.2 流域特征

白杨河流域上游达坂城区,北、西、南均有高山屏障,形成一个半封闭地势低洼的山间盆地,冷湿空气不易进入,平原区为典型温带大陆性干旱气候,显著气象特征是风多风大、酷热干燥、降水量少、蒸发强烈。流域盛行西风、西北风,年均 8 级以上大风大于 108 d。达坂城为新疆著名风区,达坂城区境内低山丘陵区年均降水量 70.5 mm,但在高山区年均降水量可高达 400 mm,降水量主要集中在夏季,占年降水量 80%,春季降水很少,年均蒸发量 2582.5 mm 为年均降水量的 36.6 倍,年均气温 8.8℃。流域下游吐鲁番市托克逊县区域,年均降水量 7.8 mm,最长连续无降水日高达 298 d,年均蒸发量 3403.9 mm,蒸发量为降水量的 436 倍,蒸发量最高可高达 5000.0 mm。下游托克逊区春、夏季焚风频繁,年均干热风发生大于 93 次,对农作物破坏性大。年均气温高达 14.1℃,是上游达坂城区年均气温 8.8℃的 1.76 倍,7 月份年均气温 32.3℃,1 月年均气温-9.3℃,日最高气温≥35℃,酷暑期长达 100 d 以上^[23],是我国极其少有的气候差异悬殊、干旱与极端干旱叠加交织流域气候。

白杨河流域整体呈现高中低山区、前山洪积与河流冲积、河谷与山间盆地、山前草甸与平原泉水溢出沼泽湿地及荒漠戈壁多样性地貌环境类型。上游源于天山博格达峰南坡冰川 42.36 亿 m³ 储量,形成年均水资源量 3.10 亿 m³,其中地下水天然补给 0.51 亿 m³^[24]。由于流域地貌环境多样性及水文地质条件影响,上游诸河道及自峡口之间地表与地下水转化补给变化较多,自峡口汇集贯穿流域下游白杨河干流,地表与地下水表现出部分河流时隐时现:大草湖至小草湖河流段常年有水,小草湖后沿程渗漏较大转换为地下水至巴依托海河道无水,巴依托海后以泉水溢出至红河谷常年有水,红河谷后沿程渗漏转换成地下水至托克逊县区域河道无水,之后托克逊县城形成地表水,途经托克逊县城后逐步转换为地下水至尾间艾丁湖。

1.3 计算方法

基于流域水生态环境结合遥感投影,考虑天然生态环境河谷林草、湿地、艾丁湖及周边骆驼刺荒漠草地三类。生态需水按 Penman-Monteith 分析^[25-26]:

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为生态植被蒸发蒸腾量,mm/d; Δ 为温度—饱和水汽压关系曲线在 T 处切线斜率,kPa/℃; R_n 为净辐射,MJ m⁻² d⁻¹; G 为土壤热通量,MJ m⁻² d⁻¹; γ 为湿度表常数,kPa/℃; T 为平均气温,℃; u_2 为 2 m 高观测风速,m/s; e_a 饱和水汽压,kPa; e_d 实际水汽压,kPa。

植被系数为生态植被阶段需水与生态植被蒸发蒸腾量比值,按下式分析:

$$K_c = \sum_{i=1}^n ET_i / ET_{0i} \quad (2)$$

式中, K_c 为植被系数; i 为生态植被生长 i 阶段; n 为生态植被生长划分阶段数目; ET_i 为生态植被生长 i 阶段需水量,mm; ET_{0i} 为生态植被生长 i 阶段蒸发蒸腾量,mm。

生态植被需水量、生态植被蒸发蒸腾量、植被系数关系如下:

$$ET = ET_0 \cdot K_c - P_0 \quad (3)$$

式中, ET 为生态植被需水,mm; ET_0 为生态植被蒸发蒸腾量,mm; K_c 为植被系数; P_0 为有效雨量,mm。降雨量

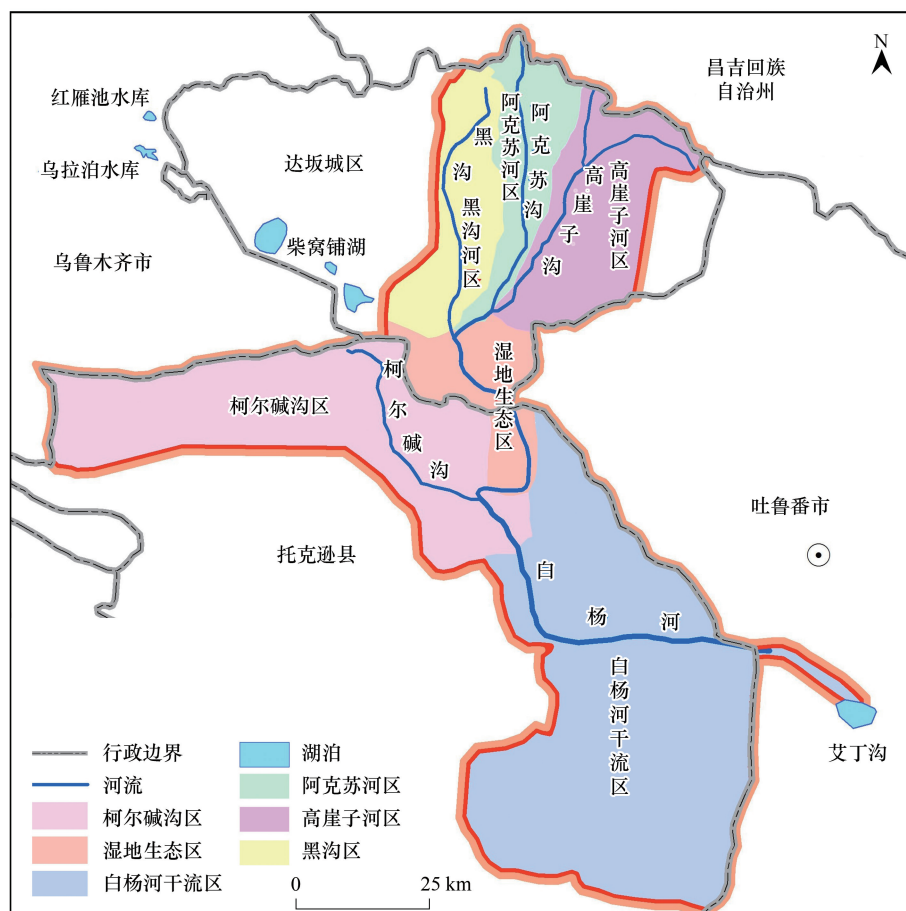


图1 白杨河流域水系生态环境分布示意

Fig.1 Distribution of ecological environment in Baiyang River Basin

P 值, $P_0 = Pa$, 新疆南疆 $a = 0.35$; 北疆 $a = 0.52$; 全疆 $a = 0.41$ [27]。

不同生态环境植被需水量,按下式分析:

$$W = ET\omega \quad (4)$$

式中, W 为生态需水量, m^3 ; ω 为各河流水系形成的生态环境植被区面积, hm^2 。

基于流域经济社会生态环境可持续发展,维持流域生态系统结构功能及生物多样性,遵循流域河流水系形成的生态环境属性,采用生态基流需水指标分析流域源流、干流河谷林草生态基流及需水量,平原湿地、尾间艾丁湖天然植被生态需水量。鉴于流域上游河谷林、湿地植被生长用水主要为河道来水下渗及降水共同补给,下游戈壁荒漠化植被生长源于地下水,采用生态基流 Tennant 法分析:

$$Tennant = \bar{Q}(i, j, A) \quad (5)$$

式中, $\bar{Q}$ 为河流年均流量, m^3/s ; i 为河流 4—9 月生态主要用水期和 10—3 月次用水期; j 为河道流量占年均流量百分数; 当 $j = 100\% - 60\%$ 时,水生物提供生长环境优良; 当 $j = 60\% - 30\%$ 时,水生物生长环境满意; 当 $j = 10\% - 30\%$ 时,水生物生长环境一般或低要求。 A 为生态基流控制断面,考虑依据①常年有水水文控制断面,②河流上有关键控制性工程,③重要水生生物栖息地、湿地等控制断面。

由于生态基流 Tennant 法依赖经验,因此,将河道生态基流与生态需水结合并满足生态需水量 W 以下关系式:

$$q = \bar{Q}(i, j, A) \geq W = ET\omega = (W/86400)/d \quad (6)$$

式中, q 为分析河流满足生态需水要求生态基流, m^3/s ; d 为分析河流满足生态需水要求的生态基流量分析时

间,天数。

调查统计数据利用 Excel 2007 进行图表绘制分析。

2 结果与分析

2.1 生态区需水分析

2.1.1 需水定额

由流域气象站长系列气象数据,以干旱区中等及强风地面覆盖 25%—50% 树木间种杂草,考虑植被系数^[28],按式(1)—(3)计算流域区不同时段及年生态需水定额如表 1 所示,结果表明,流域下游托克逊极端干旱区生态植被需水定额 1156 mm,比上游达坂城干旱区生态植被需水定额 968 mm 高出 188 mm 增加了 19.4%。

表 1 白杨河流域生态绿洲植被需水定额分析

Table 1 Analysis of vegetation Water Demand Quota of ecological Oasis in Baiyang River Basin

流域区 Drainage area	项目 Project	4—9 月 April to September	10—3 月 October to March	全年 Annual
达坂城 Dabancheng	日均 ET_0/mm	4.38	1.28	2.84
托克逊 Toksun		5.77	1.68	3.73
达坂城 Dabancheng	植被蒸发蒸腾量/mm	802	233	1035
托克逊 Toksun		1056	306	1362
达坂城 Dabancheng	植被系数 K_c	1.115	0.854	1.05
托克逊 Toksun		0.849	0.779	0.85
达坂城 Dabancheng	生态植被需水量 ET/mm	894	199	1093
托克逊 Toksun		897	263	1160
达坂城 Dabancheng	有效降水 P_0/mm	88.9	36.5	125.4
托克逊 Toksun		3.4	1.0	4.4
达坂城 Dabancheng	生态植被需水定额/mm	805	163	968
托克逊 Toksun		894	262	1156

2.1.2 生态环境及需水量

基于勘察遥感解译,流域生态环境植被类型,上游达坂城区主要为河谷林草(河谷疏林,河谷灌丛,河漫滩草甸)、湿地(沼泽草甸);下游艾丁湖及周边主要分布骆驼刺间有红柳荒漠草地(图 2)。流域河流域水系生态环境面积(表 2)显示,上游达坂城区源流平原生态区分布面积 2923.6 hm^2 ,其中:河谷林草 1502.3 hm^2 ,湿地 1421.37 hm^2 。下游白杨河(柯尔碱沟无分布)平原生态区分布面积 18639.0 hm^2 ,其中:河谷林草 602.1 hm^2 ,湿地 83.3 hm^2 ;骆驼刺及草地 17953.6 hm^2 。流域生态需水面积 21562.6 hm^2 ,其中:河谷林草 2104.4 hm^2 ,湿地 1504.6 hm^2 ;骆驼刺草地 17953.6 hm^2 。

基于表 2 生态类型面积,按式(4)得生态环境植被需水量(表 3)结果可知,流域生态总需水量 7880 万 m^3 ,其中:河谷林草(河谷疏林,河谷灌丛,河漫滩草甸)2151 万 m^3 ;湿地(沼泽草甸)1473 万 m^3 ;干流白杨河尾间艾丁湖骆驼刺草地 4256 万 m^3 。各河流区生态需水量为:黑沟河年生态需水量 921 万 m^3 ,其中:河谷林草 230 万 m^3 ;湿地 691 万 m^3 。阿克苏河年生态需水量 1048 万 m^3 ,其中:河谷林草 586 万 m^3 ;湿地 462 万 m^3 。高崖子河年生态需水量 862 万 m^3 ,其中:河谷林草 639 万 m^3 ;湿地 223 万 m^3 。干流白杨河年生态需水量 793 万 m^3 ,其中:河谷林草 696 万 m^3 ;湿地 97 万 m^3 。干流白杨河补给尾间艾丁湖骆驼刺草地水量 4256 万 m^3 ,主要考虑 9—12 月,原因在于艾丁湖补给水系复杂,包括白杨河、阿拉沟、柯尔碱沟、大河沿子、塔尔郎、煤窑沟、黑沟、恰勒坎河、二塘沟、柯柯亚河、坎尔其沟等诸河流。现状白杨河进入艾丁湖水量约 3024 万 m^3 。艾丁湖周边分布骆驼刺草甸植被约 27313.9 hm^2 ,据流域下游托克逊县境内白杨河、阿拉沟两河年均径流分摊,白杨河供给骆驼刺生态用水面积 17953.6 hm^2 (占生态用水总面积 65%)。由此 9—12 月白杨河干流末端骆驼刺草

甸植被生态需水定额 238 mm。



图 2 白杨河流域不同类型生态环境植被
Fig. 2 Different types of ecological environment vegetation in Baiyang River Basin

表 2 白杨河流域平原区不同生态类型分布面积/hm²

Table 2 Distribution Area Units of different Ecological Types in Plain Area of Baiyang River Basin								
流域区 Drainage area	河湖 Rivers and lakes	河谷林草				湿地沼 泽草甸 Wetland swamp meadow	艾丁湖 骆驼刺草地 Ayding Lake camel thorn grassland	合计 Total
		河谷疏林 Sparse forest in River Valley	河谷灌丛 Valley thicket	河漫滩草甸 Floodplain meadow	小计 Subtotal			
达坂城	黑沟	33.1	18.2	186.4	237.7	713.7	0.0	951.4
Dabancheng	阿克苏	123.6	111.6	370.0	605.2	477.1	0.0	1082.3
	高崖子	34.4	192.4	432.6	659.4	230.5	0.0	889.9
小计 Subtotal		191.1	322.2	989.0	1502.3	1421.3	0.0	2923.6
托克逊	白杨河	110.5	370.2	121.4	602.1	83.3	0.0	685.4
Toksun	柯尔碱	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	艾丁湖	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17953.6	17953.6
小计 Subtotal		110.5	370.2	121.4	602.1	83.3	17953.6	18639.0
合计 Total		301.6	692.4	1110.4	2104.4	1504.6	17953.6	21562.6

2.2 生态基流分析

由式(5)—(6)计算生态基流表 4 结果可知,流域上游达坂城区黑沟河 4—9 月主用水期,生态基流和水量分别为 0.48 m³/s 和 766 万 m³,10—3 月次用水期,生态基流和水量分别为 0.10 m³/s 和 155 万 m³,生态需水

占年均径流 18%。阿克苏河 4—9 月主用水期,生态基流和水量分别为 $0.55\text{m}^3/\text{s}$ 和 872 万 m^3 ,10—3 月次用水期,生态基流和水量分别为 $0.11\text{m}^3/\text{s}$ 和 177 万 m^3 ,生态需水占年均径流 12%。高崖子河 4—9 月主用水期,生态基流和水量分别为 $0.45\text{m}^3/\text{s}$ 和 717 万 m^3 ,10—3 月次用水期,生态基流和水量分别为 $0.09\text{m}^3/\text{s}$ 和 145 万 m^3 ,生态需水占年均径流 12%。干流白杨河 4—9 月主用水期,生态基流和水量分别为 $0.39\text{m}^3/\text{s}$ 和 613 万 m^3 ,10—3 月次用水期,生态基流和水量分别为 $0.11\text{m}^3/\text{s}$ 和 180 万 m^3 ,生态需水占年均径流 6%。

表 3 白杨河流域平原区生态需水量分析/万 m^3

Table 3 Analysis of ecological Water Demand in Plain Area of Baiyanghe River Basin Unit

河湖 Rivers and lakes	项目 Project	4—9 月 April to September	10—3 月 October to March	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December	全年 Annual
黑沟河 Heigou River	河谷疏林	26.7	5.4	2.7	1.5	0.7	0.3	32
	河谷灌丛	14.7	3.0	1.5	0.8	0.4	0.2	18
	河漫滩草甸	150.1	30.4	15.1	8.3	4.0	1.8	181
	小计	191.4	38.8	19.2	10.5	5.0	2.3	230
	湿地(沼泽草甸)	574.7	116.6	57.8	31.6	15.1	6.9	691
	合计	766.1	155.4	77.0	42.1	20.2	9.2	921
阿克苏河 Aksu River	河谷疏林	99.5	20.2	10.0	5.5	2.6	1.2	120
	河谷灌丛	89.9	18.2	9.0	4.9	2.4	1.1	108
	河漫滩草甸	297.9	60.4	29.9	16.4	7.8	3.6	358
	小计	487.3	98.9	49.0	26.8	12.8	5.9	586
	湿地(沼泽草甸)	384.2	77.9	38.6	21.1	10.1	4.6	462
	合计	871.5	176.8	87.6	47.9	22.9	10.5	1048
高崖子河 Gaoyazi River	河谷疏林	27.7	5.6	2.8	1.5	0.7	0.3	33
	河谷灌丛	154.9	31.4	15.6	8.5	4.1	1.9	186
	河漫滩草甸	348.4	70.7	35.0	19.2	9.2	4.2	419
	小计	531.0	107.7	53.4	29.2	14.0	6.4	639
	湿地(沼泽草甸)	185.6	37.6	18.7	10.2	4.9	2.2	223
	合计	716.6	145.3	72.0	39.4	18.9	8.6	862
干流白杨河 The main stream of Baiyang River	河谷疏林	98.8	29.0	11.9	8.0	4.2	2.1	128
	河谷灌丛	331.1	97.0	40.0	27.0	13.9	6.9	428
	河漫滩草甸	108.6	31.8	13.1	8.8	4.6	2.3	140
	小计	538.6	157.8	65.0	43.8	22.6	11.3	696
	湿地(沼泽草甸)	74.5	21.8	9.0	6.1	3.1	1.6	97
	合计	613.1	179.6	74.0	49.9	25.7	12.9	793
艾丁湖 Ayding Lake	骆驼刺草地	1938.6	2317.2	1938.6	1306.8	673.9	336.5	4256
	合计	1938.6	2317.2	1938.6	1306.8	673.9	336.5	4256
流域 Basin	河谷疏林	252.7	60.2	27.4	16.5	8.2	3.9	313
	河谷灌丛	590.6	149.6	66.1	41.2	20.7	10.1	740
	河漫滩草甸	905.0	193.3	93.1	52.6	25.5	11.9	1098
	小计	1748.3	403.1	186.6	110.3	54.5	25.9	2151
	湿地(沼泽草甸)	1219.0	254.0	124.0	69.0	33.3	15.3	1473
	骆驼刺草地	1938.6	2317.2	1938.6	1306.8	673.9	336.5	4256
	总计	4905.9	2974.2	2249.2	1486.1	761.6	377.7	7880

流域下游托克逊境内及艾丁湖 4—9 月主用水期,生态基流和水量分别为 $1.23\text{m}^3/\text{s}$ 和 1939 万 m^3 ,10—3 月次用水期,生态基流和水量分别为 $1.47\text{m}^3/\text{s}$ 和 2317 万 m^3 ,生态需水占年均径流 32%。全流域河流生态基流 $2.50\text{m}^3/\text{s}$,生态需水量 7880 万 m^3 ,其中:4—9 月主用水期,生态基流和水量分别为 $3.10\text{m}^3/\text{s}$ 和 4906 万

m^3 , 10—3 月次用水期, 生态基流和水量分别为 $1.89\text{m}^3/\text{s}$ 和 2974万 m^3 , 生态需水占年均径流 17%, 介于 10%—30%, 属于水生态环境一般或较低要求。鉴于生态需水及河道生态基流遵循河流水系属性, 因此, 流域生态基流量可利用黑沟、阿克苏、高崖子渠首引水工程调配。

表 4 白杨河流域平原区生态基流及控制断面

Table 4 Ecological Base flow and Control Section in Plain area of Baiyanghe River Basin

河流 Rivers	年均径流 Annual runoff		10—3 月用水期 Water use period from October to March		4—9 主用水期 4—9 Main Water use Period		年生态基流 Annual ecological base flow			控制断面 Control Section
	流量/ (m^3/s)	水量/ 万 m^3	流量/ (m^3/s)	水量/ 万 m^3	流量/ (m^3/s)	水量/ 万 m^3	流量/ (m^3/s)	水量/ 万 m^3	占年均 径流/%	
黑沟河	1.60	5035	0.10	155	0.48	766	0.29	921	18	黑沟渠首
阿克苏	2.66	8395	0.11	177	0.55	872	0.33	1048	12	阿克苏渠首
高崖子	2.19	6899	0.09	145	0.45	717	0.27	862	12	高崖子渠首
白杨河	3.99	12588	0.11	180	0.39	613	0.25	793	6	白杨河峡口
托克逊艾丁湖	4.17	13164 ^[29]	1.47	2317	1.23	1939	1.35	4256	32	小草湖断面及以下
总计 Total	14.61	46081	1.89	2974	3.10	4906	2.50	7880	17	5

2.3 流域生态需水特性

需水量是生态植被耗水分析重要指标, 基于这一指标分析了新疆部分流域生态需水变化情况。由表 5 分析表明, 生态需水与环境气象间具有很好相关性, 但流域地理环境位置不同, 对生态需水影响效应表现出一定差异: 对生态需水 $M(\text{mm})$ 产生负效应(导致生态需水增加)影响因素, 白杨河流域是风速 u 、日照时数 n 、相对湿度 U 、蒸发量 W ; 和田河流域是气温 T 、风速 u 、日照时数 n 、相对湿度 U 、蒸发量 W ; 叶尔羌河流域是气温 T 、风速 u 、相对湿度 U 、蒸发量 W ; 阿克苏河流域是有效降水 P_0 、气温 T 、风速 u 、相对湿度 U 、蒸发量 W ; 巴州孔雀河流域是有效降水 P_0 、气温 T 、水汽压 e 、蒸发量 W ; 玛纳斯河流域是气温 T 、风速 u 、蒸发量 W ; 博尔塔拉河流域是气温 T 、水汽压 e 、风速 u 、蒸发量 W 。分析表明, 不同流域生态需水产生负效应共同影响因素是蒸发量 W , 环境因素对生态需水影响程度大小为 $u > n > T > U > e > W$; 产生正效应(导致生态需水量减少)影响因素主要是水汽压 e 、有效降水 P_0 、气温 T , 对生态需水影响程度大小为 $e > P_0 > T > n > u > U$ 。这说明, 不同地理环境流域生态需水量受当地综合气象环境共同影响作用, 其中生态需水负效应主因为风速 u 和日照 n , 正效应主因体现在水汽压 e 和有效降水 P_0 。

表 5 流域生态需水与环境关系分析

Table 5 Analysis on The Relationship Between Ecological Water Demand and Environment

流域 Basin	回归方程 Regression Equation	相关 Related
白杨河流域 Baiyang River Basin	$M = -54.14 - 3.59 P_0 - 0.25 T - 6.98 e + 9.37 u + 4.12 n + 0.83 U + 0.34 W$	0.999 **
和田河流域 Hotan River Basin	$M = -4.87 - 1.32 P_0 + 0.88 T - 10.23 e + 12.29 u + 0.07 n + 0.30 U + 0.13 W$	0.999 **
叶尔羌河流域 Yarkant River Basin	$M = -15.14 - 0.24 P_0 + 0.61 T - 7.58 e + 16.73 u - 0.61 n + 0.35 U + 0.17 W$	0.999 **
阿克苏河流域 Aksu River Basin	$M = -30.22 + 0.004 P_0 + 1.04 T - 10.14 e + 28.71 u - 0.52 n + 0.45 U + 0.09 W$	0.999 **
巴州孔雀河流域 Bazhou Kongque River Basin	$M = 44.47 + 0.45 P_0 + 0.34 T + 0.26 e - 2.23 u - 1.87 n - 0.28 U + 0.18 W$	0.999 **
玛纳斯河流域 Manas River Basin	$M = 58.85 - 2.44 P_0 + 0.83 T - 0.23 e + 16.41 u - 3.28 n - 0.39 U + 0.16 W$	0.999 **
博尔塔拉河流域 Bortala River Basin	$M = 34.70 - 1.31 P_0 + 0.44 T + 2.71 e + 8.70 u - 1.50 n - 0.24 U + 0.16 W$	0.999 **

$$R \geq R_{(10, 0.01)} = 0.708$$

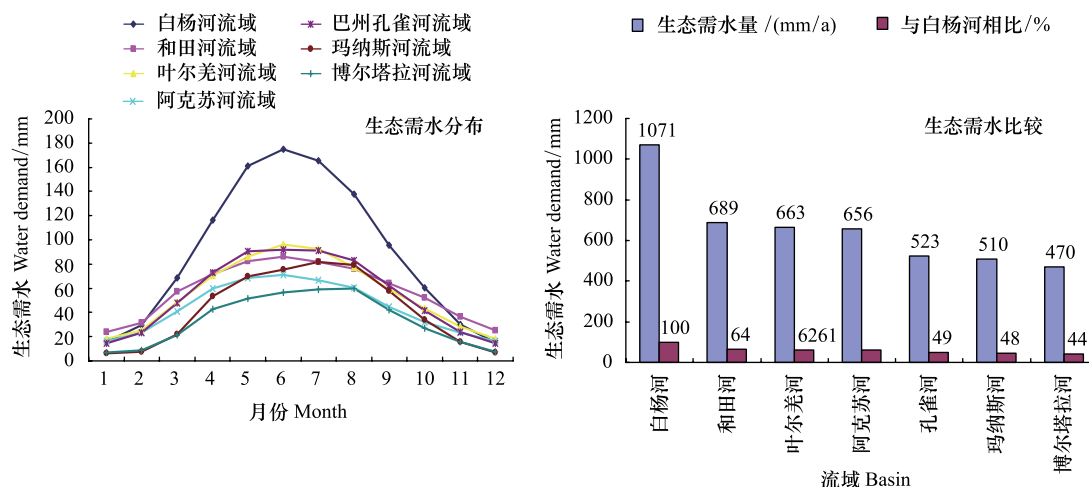


图3 干旱区部分流域生态需水变化分析

Fig.3 Analysis of ecological water demand change in some watersheds in arid area

由图3分析可以看出,不同流域年内生态需水 M (mm)变化,具有随着月份增加呈现由小渐增7至8月最大,之后逐渐减小的变化规律。从不同流域生态需水量比较看出,白杨河、和田河、叶尔羌河、阿克苏河、巴州孔雀河、玛纳斯河、博尔塔拉河7个流域年生态需水,分别为1071mm、689mm、663mm、656mm、523mm、510mm、470mm,以白杨河流域年生态需水量为基准,其他6个流域分别占白杨河流域生态需水量的64%、62%、61%、49%、48%、44%。明显看出,白杨河流域生态需水量最大,博尔塔拉河流域生态需水量最小。白杨河流域地处天山东部,降水稀少气候干燥气温高,尤其是风多风大频繁干旱与极端干旱区。天山以南昆仑山脉和田河、叶尔羌河流域,降水少蒸发量高气象干旱荒漠区。阿克苏河、巴州孔雀河流域地处天山之南,降水稀少蒸发强烈沙漠绿洲灌区。玛纳斯河、博尔塔拉河流域地处天山北坡准格尔盆地前缘及天山西部,年均降水150—200mm,年均蒸发量1700—2000mm棕漠土区。分析结果与流域所处地理环境气象因素吻合。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)流域上游达坂城生态区年需水量3624万 m^3 ,其中:黑沟需水量921万 m^3 (河谷林草230万 m^3 ;湿地691万 m^3);阿克苏生态需水量1048万 m^3 (河谷林草586万 m^3 ;湿地462万 m^3);高崖子生态需水量862万 m^3 (河谷林草639万 m^3 ;湿地223万 m^3);干流白杨河年生态需水量793万 m^3 (河谷林草696万 m^3 ;湿地97万 m^3),流域下游干流白杨河补给艾丁湖及周边骆驼刺草地生态水量4256万 m^3 。流域年均生态需水总量7880万 m^3 。

(2)流域河道总体生态基流2.50 m^3/s ,占年均径流量的17%,其中:上游达坂城区黑沟河生态基流0.29 m^3/s ,占该河年均径流量18%;阿克苏分别为0.33 m^3/s 和12%;高崖子分别为0.27 m^3/s 和12%;出自峡口白杨河干流分别为0.25 m^3/s 和6%。下游托克逊境内由白杨河干流调节艾丁湖生态基流1.35 m^3/s ,占年均径流量的32%。

(3)流域内生态环境植被耗水具有明显流域特征,上游生态植被生长依附于河流及地下水转化和天然降水共同补给;下游由于降水稀缺完全依赖河道径流补给地下水作用。生态需水量调节与河道取水工程相关,生态用水控制断面即该河道渠首引水工程。

(4)生态植被需水是表征水生态环境用水重要指标,白杨河流域年生态需水量1071mm,天山南部和田河、叶尔羌河、阿克苏河、巴州孔雀河,天山北部玛纳斯河、博尔塔拉河流域年生态需水量,分别占白杨河流域的64%、62%、61%、49%、48%,说明白杨河流域地处极端干旱区生态环境耗水高的基本特性。

3.2 讨论

(1)常用的生态基流水文学 Tennant 法,以河流年均径流量的 10%—30% 估算植被生长环境需水,此方法由于人为选取参数计算结果与实际存在差别。本文以生态区年内不同时段需水为前提反演河流生态基流,虽然得出生态基流占河道年均径流量比例在 10%—30%,但这种方法将生态区需水与河流径流年内分配结合更贴切实际。

(2)有学者和研究人员多以 4 至 10 月作为植被生长期生态需水分析期,干旱尤其是极端干旱区降水稀少蒸发十分强烈,生态用水主要甚至完全依赖河流输水和地下潜水补给,因此考虑 11 至次年 3 月时段是稳妥的。

(3)有学者认为干旱区生态补水基本上是大流量下泄,生态基流分析实际意义不大,马玉其等人^[30]就新疆开都河水资源调度对焉耆盆地生产生活和生态影响,计算了开都河生态基流,马乐军等人^[31]提出分级分区确立水利工程最小下泄生态基流方法,为不同区域生态基流确定提供方案。干旱区河道水文生态基流分析有助于生态环境植被耗水容量,以及河道在不同阶段承担的下泄水量,为生态需水保障提供技术支持。当然具体过程需依照流域河道生态区分布及水利工程布局,在正确合理安排农业工业生活用水的基础上,可以采取抢洪大水下泄、集中利用冬春季河道水下泄等方案实施。

参考文献 (References):

- [1] 沈霞, 杨小林, 魏天锋. 干旱区植被生态需水研究现状及其评述. 高原农业, 2018, 2(5): 544-548.
- [2] 白元, 徐海量, 凌红波, 王希义. 塔里木河干流区天然植被的空间分布及生态需水. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1410-1416.
- [3] 姜亮亮, 包安明, 刘海隆, 李均力, 常存. 玛纳斯流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究. 水土保持研究, 2015, 22(3): 143-149.
- [4] 石媛媛, 马国军, 王雅云, 姜田亮, 张恒嘉. 荒漠绿洲植被生态需水研究现状及发展趋势——以民勤县为例. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 34-38, 44-44.
- [5] 刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 尹亚坤. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究. 水利学报, 2010, 41(2): 226-232.
- [6] 周建勤, 贾宏涛, 解建强. 新疆额尔齐斯河“喀塑克”-布尔津河段河谷林草生态需水分析. 西南农业学报, 2011, 24(4): 1512-1514.
- [7] 彭飞, 何新林, 刘兵, 张少博, 张叶. 干旱区荒漠植被生态需水量计算方法研究. 节水灌溉, 2017, (12): 90-93.
- [8] 郭玉丹, 何英, 彭亮. 基于生态安全的阿瓦提灌区生态需水量研究. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 241-246, 253.
- [9] 范亚云, 郭玉川, 卢刚, 陈丽华, 张晓玉, 何学敏, 杨建军. 艾比湖流域植被生态需水量. 中国沙漠, 2018, 38(4): 865-871.
- [10] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 白元, 傅彦仪, 赵新风. 塔里木河下游生态需水估算. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1198-1205.
- [11] 张丽, 董增川, 赵斌. 干旱区天然植被生态需水量计算方法. 水科学进展, 2003, 14(6): 745-748.
- [12] 魏天锋, 刘志辉. 基于改进的 Tennant 法的博尔塔拉河生态需水量计算. 干旱区研究, 2016, 33(3): 643-648.
- [13] 何兵, 高凡, 覃嫻, 黄霄. 基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构. 水土保持通报, 2019, 39(1): 160-166.
- [14] 邓晓. 河道生态基流量的新年内展布计算法. 人民黄河, 2019, 41(3): 74-78.
- [15] 潘扎荣, 阮晓红, 徐静. 河道基本生态需水的年内展布计算法. 水利学报, 2013, 44(1): 119-126.
- [16] 魏雯瑜, 刘志辉, 冯娟, 杨金明, 王敬哲. 天山北坡呼图壁河生态基流量估算研究. 中国农村水利水电, 2017, (6): 92-96.
- [17] 张华, 张兰, 赵传燕. 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例. 生态学报, 2014, 34(8): 2102-2108.
- [18] 马乐军, 张行南, 陈凯麒, 陈昂. 水利水电工程最小下泄生态基流量计算方法研析. 环境影响评价, 2017, 39(6): 1-5.
- [19] 栾清华, 刘存, 张俊, 范辉, 张世禄. 基于基流比例法的洋河干流生态基流估算. 水利水电技术, 2018, 49(6): 101-108.
- [20] Cheng B, Li H E, Yue S Y, Huang K. A conceptual decision-making for the ecological base flow of rivers considering the economic value of ecosystem services of rivers in water shortage area of Northwest China. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124-126.
- [21] 李福林, 陈华伟, 王开然, 陈学群. 地下水支撑生态系统研究综述. 水科学进展, 2018, 29(5): 750-758.
- [22] 左其亭, 梁士奎. 基于水文情势分析的闸控河流生态需水调控模型研究. 水力发电学报, 2016, 35(12): 70-76.
- [23] 新疆气象局汇编. 新疆各地州气象资料汇编. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区气象气候中心, 2018.
- [24] 新疆水利水电勘测设计研究院编制. 新疆白杨河流域综合规划报告. 乌鲁木齐: 新疆水利水电勘测设计研究院水利所, 2017.
- [25] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 肖俊夫, 刘群昌, 齐学斌. 北方地区主要农作物灌溉用水定额. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 30-36.
- [26] 曹永强, 齐静威, 王菲, 李玲慧, 路洁. 辽宁省潜在蒸散量演变规律及归因分析. 生态学报, 2020, 40(10): 3519-3525.
- [27] 王忠, 周和平, 张江辉. 新疆农业用水定额技术研究应用. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012: 69-72.
- [28] 水利部国际合作司. 美国国家灌溉工程手册. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 117-123.
- [29] 乌鲁木齐市水文水资源局编制. 新疆白杨河流域水资源评价报告. 乌鲁木齐: 新疆乌鲁木齐市水资源局, 2016.
- [30] 马玉其, 王军政, 程勇, 叶朝霞, 朱成刚, 周洪华. 基于生态基流分析的开都河水资源调度管理研究. 水资源研究, 2019, 8(5): 445-455.
- [31] 马乐军, 张行南, 王欢, 祁昌军. 水利水电工程最小下泄生态基流计算方法浅析. 水力发电, 2018, 44(8): 13-17, 46-46.