

# 干旱区新疆天然绿洲生态需水量分析

崔师胜<sup>1</sup>, 郝天鹏<sup>2</sup>, 周和平<sup>3\*</sup>, 李旗进<sup>2</sup>, 张爱民<sup>2</sup>, 张 妞<sup>2</sup>, 马占宝<sup>2</sup>, 郭文涛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>新疆白杨河流域管理局水利管理中心, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆白杨河流域管理局, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>新疆维吾尔自治区水利管理总站, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年10月13日; 录用日期: 2023年1月19日; 发布日期: 2023年2月9日

## 摘 要

山区降水冰川融雪产流和平原区几乎不产流的水文气象特征, 构建了平原区河道径流补给河谷林草及尾间湿地湖泊天然绿洲的生态格局。为研究平原河谷林草尾间湿地湖泊天然绿洲需水, 选择代表性河谷林草及河流尾间湿地植被群落生境, 采用气象、土壤、植被生理三种方法同步监测, 运用植被耗水和地统模型研究天然绿洲生态需水, 结果表明: 1) 河谷林草毛耗水强度(含有效降水) 340~520 mm/a, 净耗水强度(扣除有效降水), 北疆片区245~500 mm/a; 2) 河谷林草湿地湖泊生态毛需水量(含有效降水) 203~216亿m<sup>3</sup>, 完全依靠河流补给净需水量190~204亿m<sup>3</sup>; 3) 河流尾间平原洼地面积1 km<sup>2</sup>以上湖泊基本生态贮水量135亿m<sup>3</sup>, 河谷林草需水量62亿m<sup>3</sup>; 4) 生态需水量河流年径流量占比, 2020年、2021年及年均分别为25.6%、23.8%和24.7%; 5) 河道生态基流供给宜遵循河谷林草需水特征及河流“浅漫湿-枯平丰”规律, 不宜集中或平均式补给。

## 关键词

干旱新疆, 平原绿洲, 生态需水, 研究分析

# Analysis on Ecological Water Demand of Natural Oasis in Arid Area of Xinjiang

Shisheng Cui<sup>1</sup>, Tianpeng Hao<sup>2</sup>, Heping Zhou<sup>3\*</sup>, Qijin Li<sup>2</sup>, Aimin Zhang<sup>2</sup>, Niu Zhang<sup>2</sup>, Zhanbao Ma<sup>2</sup>, Wentao Guo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Water Conservancy Management Center of Xinjiang Baiyang River Basin Authority, Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Baiyang River Basin Authority, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Management Station, Urumqi Xinjiang

Received: Oct. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 19<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 9<sup>th</sup>, 2023

作者简介: 崔师胜(1979-), 山东郓城人, 男, 高级工程师, 主要从事水资源及灌溉工程管理研究, Email: 71228588@qq.com  
\*通讯作者 Email: xjslzhp@126.com

文章引用: 崔师胜, 郝天鹏, 周和平, 李旗进, 张爱民, 张妞, 马占宝, 郭文涛. 干旱区新疆天然绿洲生态需水量分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(1): 36-46. DOI: 10.12677/jwrr.2023.121005

## Abstract

The mountain precipitation, glacier melting and snow melting runoff producing plain has almost no hydrological and meteorological characteristics, and the ecological pattern of natural oasis where river runoff in the plain area recharges the valley forest and grass and the wetland and lake at the end is constructed. In order to study the water demand of natural oasis in the wetland and lake at the end of forest and grass in the plain valley, the representative habitat of forest and grass in the valley and wetland vegetation at the end of the river were selected, and the three methods of meteorology, soil, and vegetation physiology were used to monitor simultaneously. The vegetation water consumption and geological model were used to study the ecological water demand of natural oasis. The results showed that: 1) The gross water consumption intensity (including effective precipitation) of forest and grass in the valley was 340~520 mm/a, and the net water consumption intensity (excluding effective precipitation) was 245~500 mm/a in Northern Xinjiang. 2) Ecological gross water demand (including effective precipitation) of river valley forest grass wetland lake is 20.3~21.6 billion m<sup>3</sup>; The net water demand is 19~20.4 billion m<sup>3</sup> completely supplied by rivers. 3) At the end of the river, plain depression  $\geq 1$  km<sup>2</sup>, the basic ecological water storage of lakes is 13.5 billion m<sup>3</sup>, and the water demand of forest and grass in river valleys is 6.2 billion m<sup>3</sup>; 4) The proportion of annual runoff of rivers with ecological water demand in 2020, 2021 and the annual average is 25.6%, 23.8% and 24.7% respectively. 5) The supply of river ecological base flow should follow the characteristics of forest and grass water demand in the river valley and the rule of "shallow wet dry flat high" in the river, instead of centralized or average supply.

## Keywords

Arid Xinjiang, Plain Oasis, Ecological Water Demand, Research Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生态环境由非生物和生物生态环境构成[1], 水生环境是生物生态环境的重要组成, 水生环境基本生存或适宜最小水量[2]是维系生态环境正常功能的基本条件。新疆降水稀少蒸发强烈气温高温差大日照长, 山区与平原物候差异悬殊, 具有典型的内陆河流山区产流, 平原几乎为非产流区特征。因此, 河道内河谷林草生长[3] [4] [5]和下游尾间湖泊及周边天然绿洲需水, 完全依赖出山口以下平原区河流地表径流补给[6], 河道外[7]生态需水是为人为干预的, 包括绿地林草灌溉。

新疆全域生态需水量有诸多研究, 贾宝全[8]以林业、草场等统计数据及部分试验资料估算 1995 年生态用水总量 238 亿 m<sup>3</sup>, 其中北疆片占 17.8%; 东疆占 5.4%; 南疆占 76.8%。李兰奇[9] 2003 年分析新疆天然生态需水量 208 亿 m<sup>3</sup>, 其中河谷林草湿地 180 亿 m<sup>3</sup>; 博斯腾、乌伦古、艾比湖主要湖泊需水量 28 亿 m<sup>3</sup>, 而实际上博斯腾湖基本需水 50~60 亿 m<sup>3</sup>。周宏飞[10]等人 2005 年分析新疆生态需水约 229 亿 m<sup>3</sup>。周和平[11] 2008 年基于生境地理评估新疆山区平原区生态需水 360~440 亿 m<sup>3</sup>, 基本阈值 400 亿 m<sup>3</sup>。龙爱华等[12] 2019 年以水资源公报及水量平衡原理, 分析新疆 2016 年前后山区平原生态需水 307 亿 m<sup>3</sup>。

新疆流域生态需水量方面, 李肖杨等[13] 2020 年以孔雀河流域植被类型及多年径流, 用潜水蒸发定额法分析河道 1 km 辐射范围天然植被需水 9500 万 m<sup>3</sup>, 相当于耗水强度 203 mm。李骊等[14] 2020 年以 Landsat TM 遥感影像及流域统计年鉴, 分析克孜河流域植被生态需水 9.73 亿 m<sup>3</sup>, 确定 5.5 m 潜水蒸发极限地下水位埋深。郭

宏伟等[15]分析和田河流域生态需水红线 8.85 亿  $m^3$ 。何兵等[16]采用改进 Tennant 法、Texas 法、月保证率法、河流输沙需水等方法,分析叶尔羌河流域生态需水 2.33 亿  $m^3$ 。范文波等[17]分析玛纳斯河流域生态需水量 8.84 亿  $m^3$ ,占地表水量 38.59%。

干旱内陆河生态需水计算方面,陈敏建等[18]提出,植被水面需水量扣除有效降水部分即为径流生态需水量。施文军等[19]提出内陆河流域河道内、外生态需水项,以及河道内基础流量需水和河道外植被需水量估算方法。生态环境需水计算法[20][21]可分为水文学法、水力学法、栖息地模拟法及整体法四类。沿河植被生态需水研究常有植被蒸散量、潜水蒸发、水量平衡、生物量,最小流量、Tennant(河道年径流占比)等诸多方法,其中植被蒸散量分析结果准确性相对高,需周期性试验观测,但目前这方面监测甚少。

本研究基于代表性流域河谷林草生长蒸散量,采用三种技术方法多年同步监测,综合环境、气象水文、相关分析、植被系数、河道受水面积等因素,分析新疆平原区河谷林草及尾闾湖泊天然绿洲生态需水、生态基流及占比,为干旱区新疆生态需水河道径流调控管理提供依据。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 研究区概况

新疆地处我国西北边陲,远离海洋深居内陆腹地(73°40'E~96°18'E, 34°25'N~49°10'N),面积 166 万  $km^2$ ,占国土面积 1/6。年均降水量 154.1 mm,年均蒸发量 2125.4 mm,干旱指数 10~15,属典型温带干旱大陆性气候[22]。新疆河谷林草湿地湖泊水量由河流供给,大于 1  $km^2$ 湖泊 108~138 处,面积 5136~6969  $km^2$ ,可贮水 520 亿  $m^3$ (山区产流 385 亿  $m^3$ ;平原 135 亿  $m^3$ 只占 26%) [23][24]。新疆 570 多条河流源于山区组成流域单元,形成平原区河道径流补给河谷林草尾闾湿地湖泊天然绿洲生态格局。新疆天山北部有额尔齐斯-乌伦古河及额敏河流域,山区年降水 200~600 mm,平原年降水 100~200 mm;天山西端伊犁河流域是新疆降水最多区域[25][26],山区降水 400 mm 以上,平原降水减少;天山西部艾比湖和天山北坡中部玛纳斯河流域,山区年降水 200~550 mm,平原年降水 100~150 mm;天山东部艾丁湖和石城子河及伊吾河流域[27],山区年降水 100~500 mm,平原年降水 50~150 mm;天山南坡开孔河、渭干河、阿克苏河及喀什噶尔河流域,山区年降水 150~500 mm,平原年降水 50~100 mm;天山南端昆仑山北麓叶尔羌河及和田河流域,海拔 5000 m 以上高山区[28]年降水量 460~675 mm,平原区年降水仅 30~80 mm。由此可见,山区为源流形成区,出山口前山和平原为河道径流及散失区,河流维系着河谷林草湿地湖泊天然绿洲生态水环境。

### 2.2. 试验设计

考虑到不同生态环境植被生长状态,以“1、水生态环境类型”分区域,设置二个监测区:上游达坂城降水与河道径流互补型(1-JS)、下游托克逊降水稀缺地下水补给型(1-DS);以“2、植被群落生长优劣程度”为梯度,上游达坂城下游托克逊区,均设三个监测区位:生长中等(2-Z)、生长一般(2-B)、生长较差(2-C)。环境监测内容为土壤水分土温(TS)、植被群落生理耗水(SL)和环境气象要素(QX)。鉴于天然河谷林草乔灌木植被群落生长分布区域面积较大,因此测区不设重复的全面观测。

### 2.3. 监测方法

表 1 为河谷林草生态耗水监测区位,白杨河流域上游达坂城,代表天山北部降水与河道径流互补型环境;下游托克逊代表降水稀缺地下水补给干旱环境。上游达坂城、下游托克逊区各三个监测区位,共布设 6 台土壤水分仪全年每 4 h 自动监测 1 m 土体土壤水分土温;上游达坂城、下游托克逊区各一个监测区位,布设 2 台植被生理光谱仪,全年每 1 h 自动监测叶绿素指数、蒸散、冠层覆盖、植被系数、植物耗水;上游达坂城、下游托克逊区各一个监测区位,布设 2 台自动气象站自动观测气温、湿度、风速、日照、水汽压、降水量、蒸发。以上土壤水分仪、植被生理光谱仪和气象观测三种技术方法同步监测。

**Table 1.** Monitoring points for ecological water consumption of forest and grass in valley  
**表 1.** 河谷林草生态耗水监测点位

监测区	土壤水分仪				植被生理光谱仪		气象观测
	测号	东径	北纬	海拔/m	测号	经纬度、高程	
黑沟河 5号井	664	88°43'11"	43°48'05"	1447	A00 1532	E88°43'09"	上游达坂城区 E88°19', N43°21' 海拔 1103.5 m
	662	88°43'11"	43°48'06"	1447		N43°48'07"	
	663	88°43'11"	43°48'06"	1447		海拔: 1447 m	
托克逊艾丁湖 入湖桥	666	89°03'24"	42°76'07"	-198	A00 1521	E89°03'24"	下游托克逊艾丁湖区 E88°38', N42°48' 海拔 1.0 m
	665	89°03'29"	42°76'06"	-201		N42°76'07"	
	667	89°03'36"	42°76'08"	-201		海拔: -198 m	

## 2.4. 分析算法

基于土壤墒情监测河谷林草植被耗水分析:

$$ET_{1-2} = \left[ 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\beta_{i1} - \beta_{i2}) + P \right] / d \quad (1)$$

式中:  $ET_{1-2}$  为植被耗水, mm/d;  $i$  为土壤层次数;  $n$  为土壤层次总数目;  $\gamma_i$  为第  $i$  层土壤容量,  $g/cm^3$ ;  $H_i$  为土壤层深, m;  $\beta_{i1}$  为监测点第  $i$  层土壤起始含水率, %;  $\beta_{i2}$  为监测末段土壤含水率, %;  $P$  为时段内降水量, mm;  $d$  为始末间隔时间, d。

植被能够吸收近红外(750~1300 nm)和短波近红外(1300~2500 nm)区域辐射性能, 采用光谱遥感监测植被生长生理水分[29], 利用一阶微分可较好清除大气土壤凋落物等低频光谱成分对监测目标影响, 反映植被光谱内在特性, 进行植被生长生理叶绿素、叶面积、冠层覆盖指数、蒸散耗水等信息定量反演[30] [31]:

$$\rho(\lambda_i) = \frac{\rho(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})}{2\Delta\lambda} \approx \frac{d\rho(\lambda_i)}{d\lambda_i} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为利用近红外高光谱与植被目标之间反射率;  $\lambda$  为连续的电磁波段波长。

基于气象要素生态植被耗水:

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

式中:  $ET$  为植被耗水, mm;  $ET_0$  为植被潜在蒸散量, mm;  $K_c$  为植被系数;  $P_0$  为有效雨量, mm。

$ET_0$  由观测气温、日照、风速、水汽压、高程纬度, 经彭曼(Penman-Monteith)式计算, 植被系数  $K_c$  按下式:

$$K_c = \sum_{i=1}^n ET_i / ET_{0i} \quad (4)$$

式中:  $i$  为植被生长  $i$  阶段;  $n$  为植被生长划分阶段数目;  $ET_i$  为植被生长  $i$  阶段耗水, mm;  $ET_{0i}$  为植被生长  $i$  阶段蒸散量, mm。

基于不同流域气象水文与监测区耗水信息, 采用地统模型得不同流域植被耗水强度:

$$m = \begin{cases} X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, X_{i4}, \dots, X_{in} \\ k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n \\ R \geq R_{(a,n)} \\ F \geq F_{(a,n)} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $m$  为植被年耗水强度，mm； $X_{in}$  为生态环境影响因子； $k_n$ 、 $x_n$  为方程拟合系数和自变量因素； $R$ 、 $F$  为检验相关系数和方差； $R_{(a,n)}$ 、 $F_{(a,n)}$  为相关系数和方差临界值； $a$ 、 $n$  为置信度和统计检验样本数。

由植被耗水强度，可得流域生态需水量、生态基流、生态需水量河道径流占比：

$$W = [(m - P_0)A] \times 1000 \quad (6)$$

$$q = (W/86400)/d \quad (7)$$

$$B = (W/Q) \times 100 \quad (8)$$

式中： $W$  为生态需水量， $m^3$ ； $P_0$  为有效雨量，mm (有效降水转化系数参考[32]  $a = 0.35\sim 0.52$  平均 0.41)； $A$  为平原区河流受水面积， $km^2$ ； $q$  为河道生态基流， $m^3/s$ ； $d$  为生态基流分析时段，d； $B$  为生态需水量  $W$  河道径流量  $Q$  占比，%。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 不同环境植被水分生理

植被水分生理监测表明，上游达坂城中纬度较高海拔，植被叶绿素指数和蒸散量低于下游托克逊艾丁湖低海拔区，植被生长短波辐射量高于下游区。植被叶绿素、蒸散量、短波辐射量，随月增加变化，年内 5~8 月达峰区间，9~12 月逐渐下降，1 月和 12 月最小。达坂城区植被叶绿素、植物蒸散、短波辐射量年际变化，2020 年分别为 0.51、3.08 mm/d 和 15.0 MJ/m<sup>2</sup>，2021 年为 0.60、1.74 mm/d 和 10.1 MJ/m<sup>2</sup>；下游托克逊艾丁湖区 2020 年分别为 1.84、4.06 mm/d 和 11.3 MJ/m<sup>2</sup>，2021 年为 2.04、2.34 mm/d 和 7.6 MJ/m<sup>2</sup>。可见，较高海拔区叶绿素、植物蒸散量比低海拔区小，而植被短波辐射量则反之，这与海拔高区紫外线短波长多茎干粗短叶面小灌木林草生长，下游低海拔多可见光荒漠耐旱植被生长相关，表明干旱区生态植被在高程区域、植被蒸散、气象环境等方面差异性大。

#### 3.2. 不同环境土壤水分土温

植被土壤水分监测表明，上游达坂城区 2020 年 1 m 深土温和土壤含水率 13.4℃ 和 12.7%；2021 年为 8.6℃ 和 15.5%。下游托克逊区，2020 年 1 m 深土温和土壤含水率 19.6℃ 和 32.4%；2021 年 14.3℃ 和 31.3%。这说明上游有一定降水和河道径流影响，植被生长土壤水分土温消长变化较快，下游托克逊区主要由河道地下水补给，植被生长土壤水分土温变化相对较慢。植被生长环境土温、土壤含水率变化，逐月增加与季节一致；土壤含水率总体呈现前低中多后期降趋势，土壤含水率没有明显峰值尤其是冬春季处于较低状态，这与随机降水和地下水补给区水分补给有关，有利于植被适应环境对水分的需求。

#### 3.3. 植被耗水及植被系数

根据环境气象、土壤墒情、植被光谱三种技术监测，由式(1)至(4)分析得上游达坂城和下游托克逊植被生长耗水  $ET$  (mm/d)，从表 2 看出，植被耗水年内 1 至 8 月逐月增加，植被耗水出现 2 个峰区分别为 5 月和 7 至 8 月间，9 至 12 月耗水渐降，1 和 12 月最小。下游托克逊区耗水明显大于上游达坂城，但耗水规律趋于一致，体现了流域上下游不同干旱气候程度影响。由 2020 及 2021 年监测看出，植物系数  $K_c$  有较好重现规律，因此以植被系数  $K_c$  与气温  $T$ 、水汽压  $e$ 、风速  $u$ 、日照时数  $n$ 、相对湿度  $U$ 、降水  $P$  之间，可以拟合回归方程如式(9)~(10)所示：

$$K_c = 0.2518 - 0.0067T + 0.3971e - 0.0966u + 0.0219n - 0.0033U - 0.0054P \quad (9)$$

$$K_c = 0.8567 + 0.0096T - 0.0761e - 0.0662u - 0.0189n - 0.0049U + 0.0039P \quad (10)$$

拟合方程相关系数  $R = 0.791\sim 0.964$ ；方差  $F = 4.74\sim 36.76$ ，统计检验表明，均大于临界值  $R = 0.404\sim 0.515$  及  $F = 2.51\sim 3.67$  区间，相关系数  $R$  和方差  $F$  均有较好的显著性，由此拟合方程与不同流域环境因素关联，可拓展获得不同流域环境植被耗水参数。

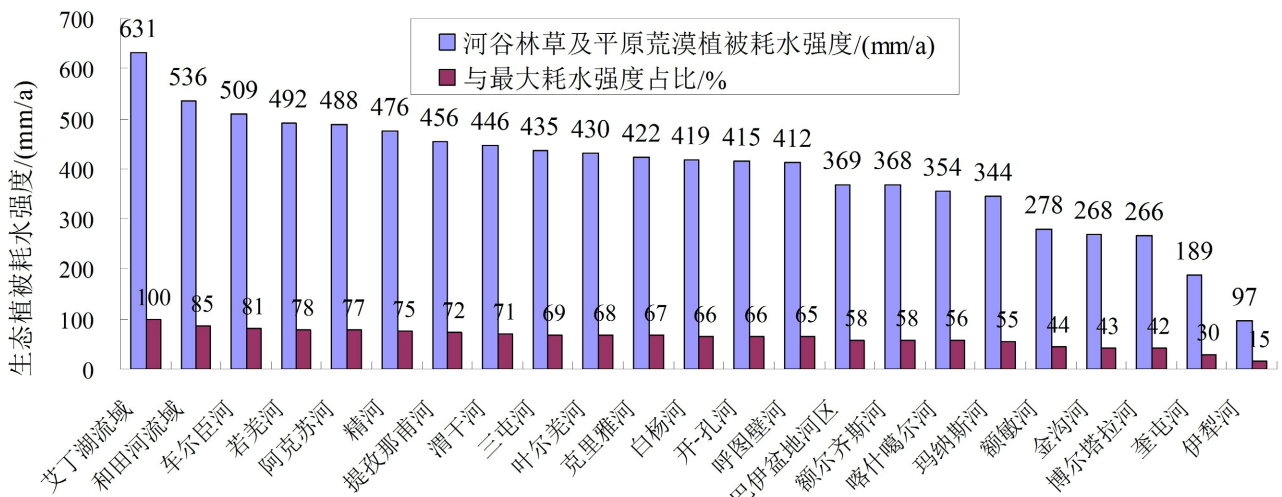
**Table 2.** Watershed vegetation water consumption by three monitoring methods for different environments  
**表 2.** 流域不同环境三种监测方法植被耗水

年	区	项目/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2020	达坂城	$ET$	0.16	0.39	0.68	0.93	1.77	1.87	2.16	1.87	1.40	1.13	0.87	0.29
		$K_c$	0.15	0.21	0.28	0.32	0.39	0.44	0.52	0.51	0.46	0.51	0.46	0.30
	托克逊	$ET$	0.23	0.36	1.23	1.77	3.00	2.83	3.10	3.65	3.47	2.03	1.17	0.35
		$K_c$	0.25	0.28	0.31	0.33	0.35	0.35	0.43	0.49	0.59	0.56	0.54	0.37
2021	达坂城	$ET$	0.16	0.29	0.58	0.87	1.52	1.60	1.90	1.45	1.27	0.77	0.40	0.19
		$K_c$	0.14	0.17	0.26	0.29	0.35	0.41	0.46	0.45	0.46	0.35	0.19	0.12
	托克逊	$ET$	0.29	0.82	1.74	2.57	4.19	4.17	4.32	3.71	3.00	2.00	0.73	0.26
		$K_c$	0.28	0.36	0.46	0.48	0.50	0.55	0.54	0.54	0.58	0.54	0.36	0.23

#### 4. 流域生态环境需水分析

##### 4.1. 植被耗水强度

植被耗水强度是生态植被用水分析基础参数，综合 23 个流域[33] [34] 33 条代表性河流以及 44 个环境气象测站，进行不同流域环境耗水特性关联分析。由表 3 植被系数  $K_c$  与气象要素拟合方程，以流域代表性河流 44 个气象测站 2009~2019 年均气象要素，计算不同流域植被系数，由植被系数与不同流域环境气象要素，以彭曼法获代表性测站植被蒸散量，按式(6)得不同流域生态植被毛耗水强度(含有效降水)、净耗水强度(扣除有效降水)。图 1 为 23 个流域 2020 至 2021 年河谷林草净耗水强度，可以看出，艾丁湖、和田河、车尔臣河、若羌河等流域年耗水强度相对高；额敏河、金沟河、博尔塔拉河、奎屯河、伊犁河等流域年耗水强度相对减小。艾丁湖流域地处天山东部，降水稀少气候干燥高温，尤其是风多风大频繁极端干旱区；昆仑山脉和田河、叶尔羌河流域降



(a) 2020 年监测分析值

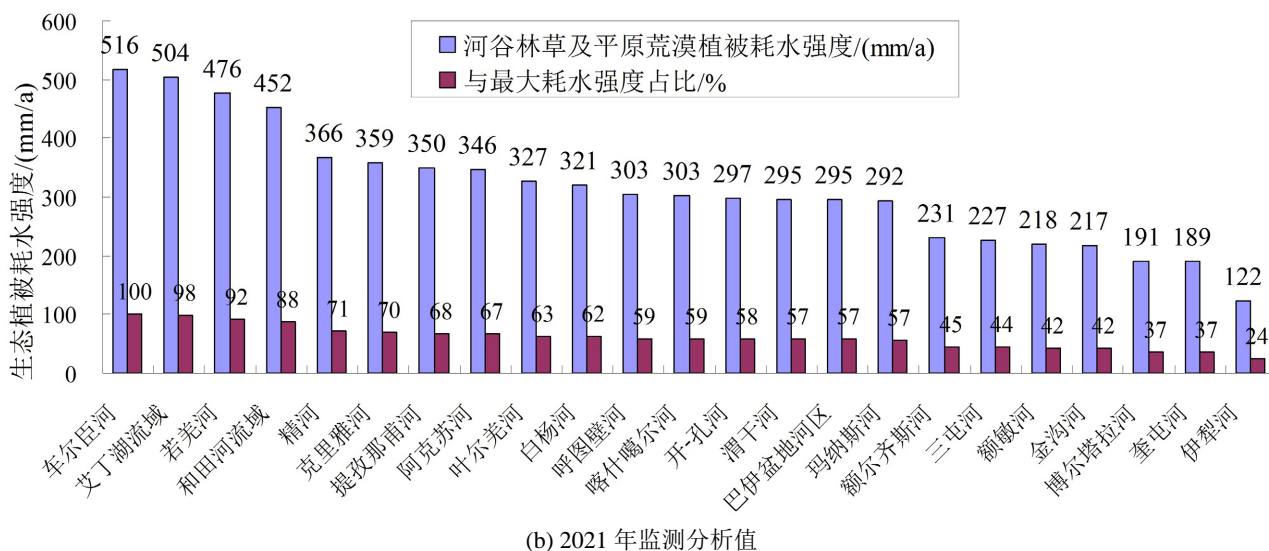


Figure 1. Annual net water consumption intensity of ecological vegetation in the basin

图 1. 流域生态植被年净耗水强度

水少蒸发量高干旱荒漠区；阿克苏、孔雀河流域地处天山之南，降水少蒸发多沙漠绿洲区；玛纳斯、博尔塔拉河流域天山北坡准格尔盆地前缘天山北部，年降水 150~200 mm，年蒸发量 1700~2000 mm。分析结果与流域地理环境水文气象情形趋势相同。

## 4.2. 生态环境需水量

### 4.2.1. 河流植被环境受水面积

出山口平原区河流植被环境范围受水面是河谷林草需水基础。河流生态环境受水面积主要考虑干流河道长度[35]影响范围。出山口以下平原区河流长度参数，采用流域河道几何图形平面投影成果[36]，出山口以下平原区干流长度 9842 km，平均宽度 1916 m，河流环境范围受水面积 18,857 km<sup>2</sup>，即全疆流域出山口以下平原区，由河流供给河谷林草植被生长受水面积 188.6 万 hm<sup>2</sup> (公顷)。

### 4.2.2. 流域需水量及径流占比

流域生态需水量分析结果见表 3，平原区河谷林草及湿地湖泊毛需水量(含有效降水)，2020~2021 年为 216.18~203.07 亿 m<sup>3</sup>；净需水量(扣有效降水)，2020~2021 年为 204.16~189.57 亿 m<sup>3</sup>。平原河流尾间洼地≥1 km<sup>2</sup> 湖泊基本贮水 135.363 亿 m<sup>3</sup>，其中阿勒泰诸河流 60.200 亿 m<sup>3</sup> 主要供给乌伦古湖；源于精河、博尔塔拉河、奎屯河等供给平原洼地艾比湖 7.000 亿 m<sup>3</sup>；昌吉天山北麓诸河流 3.610 亿 m<sup>3</sup> 供给玛纳斯湖和克拉玛依平原洼地艾里克湖；乌鲁木齐河尾间湿地湖泊 0.300 亿 m<sup>3</sup> 东道海子湖；艾丁湖流域 0.163 亿 m<sup>3</sup> 尾间艾丁湖；哈密巴伊盆地河区 1.100 亿 m<sup>3</sup> 山前平原巴里坤湖；开都孔雀河供给平原区 57.323 亿 m<sup>3</sup> 博斯腾湖及其下游沙丘罗布泊等湖泊；阿克苏渭干河 3.58 亿 m<sup>3</sup> 河流下游冲击扇洼地艾西曼湖及沙雅阿奇克达希湖；喀什噶尔河流域 0.100 亿 m<sup>3</sup> 硝尔库勒湖；叶尔羌河供给 0.477 亿 m<sup>3</sup> 平原沙丘小面积湖泊；和田河流域 0.710 亿 m<sup>3</sup> 零散平原沙丘小面积湖泊；塔里木河干流终端台特玛湖 0.800 亿 m<sup>3</sup>。生态环境净需水量河流径流占比 2020~2021 年 25.6%~23.8%。由图 2 看出，生态环境净需水量河流径流占比由小到大流域区为：伊犁、塔河干流、和田、喀什、阿克苏、乌鲁木齐、克州、昌吉、哈密、博州、吐鲁番、阿勒泰、巴州。河流径流占比最高前 5 位巴州、阿勒泰、吐鲁番、博州及哈密流域片区；占比最小前 5 位伊犁、塔额、塔河干流、和田及喀什流域片区。可见，平原区湿地湖泊贮水及其数量是增加生态水量比重的主要原因。

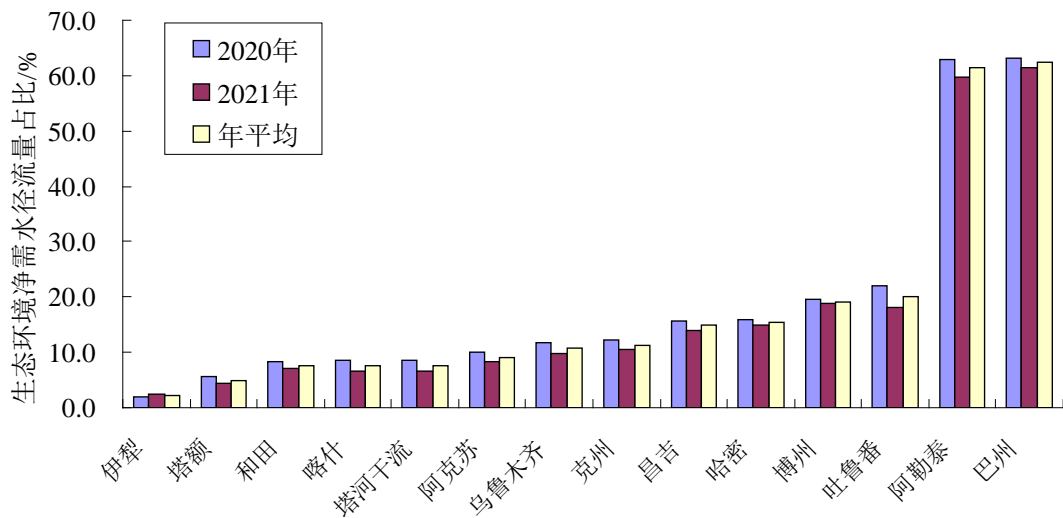
### 4.2.3. 生态基流及供给配置

生态基流是河湖分区阶段供给调控管理的重要抓手[37], 由监测区植被耗水与河道径流对比(图 3)看出, 河谷林草耗水 1 至 8 月逐月增加, 8 月之后随之逐渐下降, 植被耗水峰期与河道年径流变化有同步相似性。因此, 生态基流供给宜遵循植被耗水“浅漫湿”特征及河流年径流“枯平丰”季节属性, 不宜集中或平均式供给调配。

**Table 3.** Ecological water demand in plain area of Xinjiang basin (Unit:  $10^8 \text{ m}^3$ )

**表 3.** 新疆流域平原区生态需水量(单位: 亿  $\text{m}^3$ )

流域属地	流域区	$\geq 1 \text{ km}^2$ 湖泊需水量	生态植被及湖泊毛需水量		生态植被及湖泊净需水量		生态净需水量河流径流占比/%	
			2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
塔城	额敏河	0.000	2.04	1.79	1.36	1.06	5.5	4.3
阿勒泰	阿勒泰诸河	60.200	71.48	67.77	70.01	66.36	63.0	59.7
博州	艾比湖流域	7.000	8.71	8.42	8.27	8.00	19.5	18.8
伊犁	伊犁诸河流	0.000	9.33	11.24	3.14	3.95	2.0	2.5
昌吉	天山北麓诸河	3.610	6.67	6.02	6.06	5.43	15.7	14.1
乌鲁木齐	乌鲁木齐河	0.300	1.33	1.10	1.28	1.05	11.8	9.7
吐鲁番	艾丁湖流域	0.163	2.05	1.65	2.03	1.65	22.1	18.0
哈密	巴伊盆地河区	1.100	1.71	1.60	1.65	1.54	16.0	14.9
巴州	开孔河流域	57.323	66.60	64.82	66.16	64.38	63.2	61.5
阿克苏	阿克苏渭干河	3.580	6.85	5.80	6.69	5.64	9.9	8.4
克州	喀什噶尔河	0.100	8.23	7.17	7.35	6.31	12.1	10.4
喀什	叶尔羌河流域	0.477	6.18	4.89	5.90	4.61	8.6	6.7
和田	和田河流域	0.710	7.66	6.62	7.43	6.40	8.3	7.1
	塔里木河干流	0.800	17.44	13.84	16.82	13.18	8.6	6.7
	全域	135.363	216.18	203.07	204.16	189.57	25.6	23.8



**Figure 2.** Proportion of annual runoff of ecological clean water channels in plain area

**图 2.** 平原区生态净用水河道年径流量占比分布



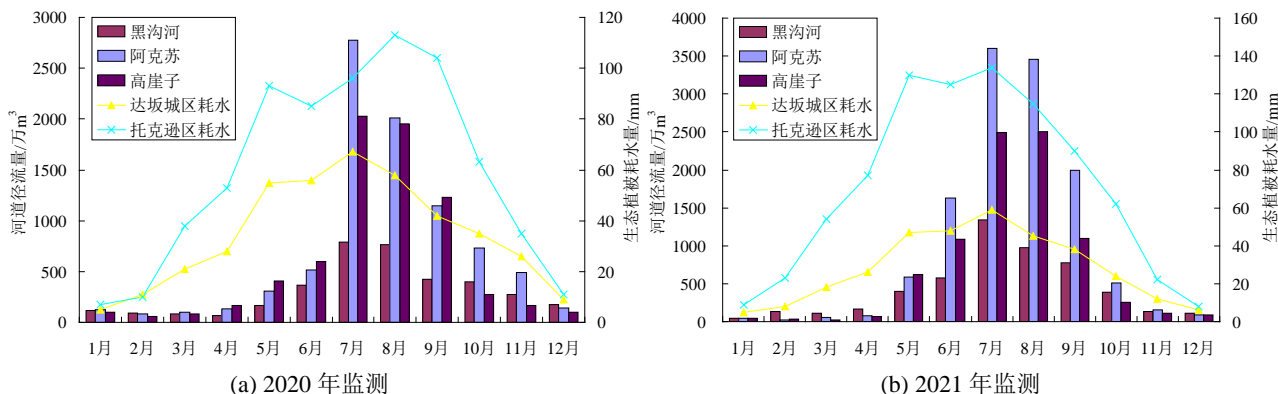


Figure 3. Relationship between ecological water consumption and river runoff in the monitoring area of the basin  
图 3. 流域监测区生态耗水与河道径流关系

### 5. 结论

综合环境气象水文、相关分析、植被系数、河道受水等因素，分析了干旱区新疆生态植被耗水强度及需水量。平原区生态毛需水量(含有效降水)，2020年和2021年为217和203亿m<sup>3</sup>。平原区生态净需水量(扣有效降水)，2020年和2021年为204和190亿m<sup>3</sup>，其中河流尾间平原洼地≥1 km<sup>2</sup>湖泊基本生态贮水量135亿m<sup>3</sup>；河谷林草需水量69~45亿m<sup>3</sup>。生态水河流径流量占比，2020和2021年为25.6%、23.8%。河道生态基流供给调控宜遵循河谷林草需水“浅漫湿”及河流“枯平丰”属性规律，不宜集中一次或平均式水量调配。

### 基金项目

新疆水利科技专项(YF2020-01; XSKJ-2022-17)。

### 参考文献

- [1] 孙儒泳, 李庆芳, 牛翠娟, 等. 基础生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
SUN Ruyong, LI Qingfang, NIU Cuijuan, et al. Basic ecology. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 胡顺军. 塔里木河干流流域生态——环境需水研究[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.  
HU Shunjun. Study on ecological environmental water demand in the main stream of Tarim River basin. Ph.D. Thesis, Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 白涛, 许佳, 邓铭江, 等. 注重干旱区河谷林草生态保护与修复的滴漫灌溉研究[J]. 水利学报, 2021, 52(8): 989-1000.  
BAI Tao, XU Jia, DENG Mingjiang, et al. Research on Li-Man irrigation focusing on ecological protection and restoration of forest and grass in river valleys in arid areas. Journal of Water Resources, 2021, 52(8): 989-1000. (in Chinese)
- [4] PENG, Y. Q., XIAO, Y. X., FU, Z. T., et al. Precision irrigation perspectives on the sustainable water-saving of field crop production in China: Water demand prediction and irrigation scheme optimization. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 365-377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.347>
- [5] 邓铭江, 黄强, 张岩, 等. 额尔齐斯河水库群多尺度耦合的生态调度研究[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1387-1398.  
DENG Mingjiang, HUANG Qiang, ZHANG Yan, et al. Study on multi-scale coupling ecological regulation of Erqisi River reservoir group. Journal of Water Resources, 2017, 48(12): 1387-1398. (in Chinese)
- [6] 粟晓玲, 康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 740-744.  
SU Xiaoling, KANG Shaozhong. The concept of ecological water demand and its calculation method. Progress in Water Science. 2003, 14(6): 740-744. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国水利部. SL/Z 712-2014 河湖生态环境需水计算规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 1-35.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for calculation of water demand of river and lake ecological environment. SL/Z 712-2014. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1-35. (in Chinese)
- [8] 贾宝全. 新疆生态用水量的初步估算[J]. 生态学报, 2000(2): 243-250.  
JIA Baoquan. Preliminary estimation of ecological water consumption in Xinjiang. Journal of Ecology, 2000(2): 243-250. (in Chinese)

Chinese)

- [9] 李兰奇. 新疆水资源利用与农业可持续发展分析[J]. 中国水利, 2003(3): 54-57.  
LI Lanqi. Analysis on water resources utilization and agricultural sustainable development in Xinjiang. China Water Conservancy, 2003(3): 54-57. (in Chinese)
- [10] 周宏飞, 张捷斌. 新疆的水资源可利用量及其承载能力分析[J]. 干旱区地理, 2005(6): 756-763.  
ZHOU Hongfei, ZHANG Jiebin. Analysis on the available water resources and its carrying capacity in Xinjiang. Geography of Arid Areas, 2005(6): 756-763. (in Chinese)
- [11] 周和平. 干旱内陆新疆区水生态阈值及保障机制[M]//黄真理. 中国环境与生态水力学. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 431-438.  
ZHOU Heping. Water ecological threshold and guarantee mechanism in arid inland Xinjiang. In HUANG Zhenli. China's environment and ecological hydraulics. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008: 431-438. (in Chinese)
- [12] 龙爱华, 魏潇娜, 张继, 等. 近 16 年来新疆内陆河区生态耗水及其变化分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 170-177.  
LONG Aihua, WEI Xiaona, ZHANG Ji, et al. Analysis of ecological water consumption and its change in inland river areas of Xinjiang in recent 16 years. Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 50(12): 170-177. (in Chinese)
- [13] 李肖杨, 朱成刚, 马玉其, 等. 新疆孔雀河流域生态基流与天然植被需水量研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 337-345.  
LI Xiaoyang, ZHU Chenggang, MA Yuqi, et al. Study on ecological basic flow and natural vegetation water demand in the Peacock River basin of Xinjiang. Geography of Arid Areas, 2021, 44(2): 337-345. (in Chinese)
- [14] 李骊, 张青青, 李宏, 等. 近 28a 克孜河流域天然植被需水满足程度研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1075-1084.  
LI Li, ZHANG Qingqing, LI Hong, et al. Study on the water demand satisfaction of natural vegetation in the Kizilsu River basin in recent 28 years. Research on Arid Areas, 2021, 38(4): 1075-1084. (in Chinese)
- [15] 郭宏伟, 徐海量, 凌红波, 等. 和田河流域生态保护红线划定初探[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 235-243.  
GUO Hongwei, XU Hailiang, LING Hongbo, et al. Preliminary study on delineation of ecological protection red line in Hotan River basin. Agricultural Research in Arid Areas, 2017, 35(6): 235-243. (in Chinese)
- [16] 何兵, 高凡, 覃姗, 等. 基于多种水文学方法的干旱区内陆河流健康流量重构[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 160-166.  
HE Bing, GAO Fan, QIN Shan, et al. Reconstruction of healthy flow of inland rivers in arid areas based on multiple hydrological methods. Water and Soil Conservation Bulletin, 2019, 39(1): 160-166. (in Chinese)
- [17] 范文波, 周宏飞, 李俊峰. 玛纳斯河流域生态需水量估算[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 242-245.  
FAN Wenbo, ZHOU Hongfei and LI Junfeng. Estimation of ecological water demand in Manas River basin. Research on Water and Soil Conservation, 2010, 17(6): 242-245. (in Chinese)
- [18] 陈敏建, 王浩, 王芳. 内陆河干旱区生态需水分析[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2136-2142.  
CHEN Minjian, WANG Hao and WANG Fang. Analysis of ecological water demand in inland river arid areas. Journal of Ecology, 2004, 24(10): 2136-2142. (in Chinese)
- [19] 施文军, 凌红波. 流域生态需水概念及估算方法评述[J]. 水利规划与设计, 2013(8): 31-36.  
SHI Wenjun, LING Hongbo. Review on the concept and estimation method of ecological water demand in river basin. Water Conservancy Planning and Design, 2013(8): 31-36. (in Chinese)
- [20] 尚文绣, 王忠静, 赵钟楠, 等. 水生态红线框架体系和划定方法研究[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 934-941.  
SHANG Wenxiu, WANG Zhongjing, ZHAO Zhongnan, et al. Research on the framework system and delineation method of water ecological red line. Journal of Water Resources, 2016, 47(7): 934-941. (in Chinese)
- [21] 张爱民, 张妞, 周和平. 干旱与极端干旱白杨河流域生态需水分析[J]. 水资源开发与管理, 2020, 52(5): 35-43.  
ZHANG Aimin, ZHANG Niu and ZHOU Heping. Analysis of ecological water demand in the Baiyang River basin in drought and extreme drought. Water Resources Development and Management, 2020, 52(5): 35-43. (in Chinese)
- [22] 中国地图册[M]. 北京: 中国地图出版社, 2012: 168-172.  
Atlas of China. Beijing: China Map Publishing House, 2012: 168-172. (in Chinese)
- [23] 杜农, 史军, 张平. 新疆湿地[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2007.  
DU Nong, SHI Jun and ZHANG Ping. Xinjiang Wetlands. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [24] 周聿超. 新疆河流水文水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999.  
ZHOU Yuchao. Xinjiang River Water Resources. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [25] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 514-527.  
SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. Response of glaciers and snow cover in Xinjiang to climate change (I): Hydrological effects. Glacier Permafrost, 2013, 35(3): 514-527. (in Chinese)
- [26] 王秀娜, 丁永建, 吴锦奎, 等. 近 50a 来伊犁河流域冰川变化及其对气候的响应[Z]. 2014.  
WANG Xiuna, DING Yongjian, WU Jinkui, et al. Glacier change in the Ili River basin and its response to climate in recent 50

- years. 2014. (in Chinese)
- [27] 骆光晓, 若孜汗·塔依尔. 新疆哈密石城子河流域水文水资源分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25(4): 479-484.  
LUO Guangxiao, RUOZIHAN Ta'er. Hydrology and water resources analysis of Shichengzi River basin in Hami, Xinjiang. Research on Arid Areas, 2008, 25(4): 479-484. (in Chinese)
- [28] 张详松. 喀喇昆仑山叶尔羌河冰川与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1991.  
ZHANG Xiangsong. Glacier and environment of Yarkant River in Karakorum Mountains. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [29] 张峰, 周广胜. 植被含水量高光谱遥感监测研究进展[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 517-525.  
ZHANG Feng, ZHOU Guangsheng. Research progress in hyper-spectral remote sensing monitoring of vegetation water content. Journal of Plant Ecology, 2018, 42(5): 517-525. (in Chinese)
- [30] 林毅, 李倩, 王宏博, 等. 高光谱反演植被水分含量研究综述[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 162-167.  
LIN Yi, LI Qian, WANG Hongbo, et al. A review of studies on hyper-spectral retrieval of vegetation moisture content. China Agricultural Bulletin, 2015, 31(3): 162-167. (in Chinese)
- [31] 沈涛. 干旱区植被光谱特征分析研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2004.  
SHEN Tao. Study on spectral characteristics of vegetation in arid areas. Master's Thesis, Urumqi: Xinjiang University, 2004. (in Chinese)
- [32] 王忠, 周和平, 加帕尔·肉孜. 干旱灌区有效降雨量利用率研究[J]. 节水灌溉, 2010(12): 44-47.  
WANG Zhong, ZHOU Heping and JAPAR Mezi. Study on the utilization rate of effective rainfall in arid irrigation areas. Water Saving Irrigation, 2010(12): 44-47. (in Chinese)
- [33] 新疆水利厅. 新疆水资源公报[R]. 2016.  
Xinjiang Water Resources Department. Xinjiang water resources bulletin. 2016. (in Chinese)
- [34] 中国地图出版社. 中国地图册[M]. 北京: 中国地图出版社, 2012: 171-172.  
China Map Publishing House. Atlas of China. Beijing: China Map Publishing House, 2012: 171-172. (in Chinese)
- [35] 叶康. 吐鲁番盆地水文特性与区划[J]. 能源与节能, 2017, 137(2): 110-111.  
YE Kang. Hydrological characteristics and zoning of Turpan basin. Energy and Energy Conservation, 2017, 137(2): 110-111. (in Chinese)
- [36] 邓铭江, 王志杰, 等. 中国新疆河湖全书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
DENG Mingjiang, WANG Zhijie, et al. The complete works of rivers and lakes in Xinjiang, China. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010. (in Chinese)
- [37] 柴朝晖, 姚仕明. 河流生态研究热点与进展[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 68-74.  
CHAI Chaohui, YAO Shiming. Research hotspot and progress of river ecology. Yangtze River, 2021, 52(4): 68-74. (in Chinese)