文章编号: 1672-3317 (2020) 04-0106-10

# 基于植被蒸散发法的孔雀河流域天然植被生态需水估算

杨媛媛<sup>1,2</sup>,徐长春<sup>1,2\*</sup>,罗映雪<sup>1,2</sup>,杨秋萍<sup>1,2</sup>,陈 丽<sup>1,2</sup> (1.新疆大学 资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046; 2.新疆大学 资源与环境科学学院绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046)

摘 要:【目的】定量天然植被生态需水,为流域有限水资源的合理分配和使用供科学依据和决策参考。【方法】采 用 FAO56 Penman-Monteith 公式,结合干旱强度指数 DSI,分析新疆孔雀河流域 2000—2016 年天然植被生态需水 时空变化特征,并计算了不同干、湿状况下天然植被的生态需水。【结果】①研究区内天然植被生长季多年平均生 态需水量为 7.575 7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,天然草地需水量大于天然林地需水量。②从时间上看,2000—2016 年天然植被生长季 生态需水总量以 2006 年为分界点整体上呈现出上升-下降波动趋势;在生长季内变化特征上,天然植被的生态需水 主要集中在 6—8 月,占植被主要生长季全部需水量的 69.64%;从空间上看,天然植被生态需水主要集中在绿洲区 的农区外围及河流中、上游两侧。③不同干、湿状况下,天然林、草地单位面积生态需水量均表现为:正常年>湿 润年>轻度干旱年>极度干旱年,天然植被生态需水总量呈现:极度干旱年>正常年>轻度干旱年>湿润年。【结论】 不同干湿条件下天然植被生态需水存在差异,气候因子和天然植被面积的变化是导致生态需水差异的主要因素。 关键词:Penman-Monteith;生态需水;天然植被;孔雀河

中图分类号:K903

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019332

杨媛媛,徐长春,罗映雪,等.基于植被蒸散发法的孔雀河流域天然植被生态需水估算[J].灌溉排水学报, 2020, 39(4): 106-115.

YANG Yuanyuan, XU Changchun, LUO Yingxue, et al. Estimation of Ecological Water Requirement for the Natural Vegetation in the Kongque River Basin based on Vegetation Evapotranspiration [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 106-115.

## 0引言

【研究意义】生态需水是干旱区内陆河流域当前 水文学、生态学、环境学等领域的研究热点。作为干 旱区最关键的生态环境因子,水不仅是干旱区绿洲生 态系统构成、发展和稳定的基础和依据,而且决定着 干旱区绿洲化过程与荒漠化过程这二类极具对立和 冲突性的生态环境演化过程<sup>[1-2]</sup>。"有水即为绿洲,无 水皆为荒漠",干旱区非地带性植被是生态环境中十 分脆弱、也是最容易受到破坏的部分,它是整个流域 生态系统最主要的保护对象,但往往因人类对水资源 的无序开发而导致缺水,发生急剧衰败或死亡<sup>[3]</sup>。因 此,量化天然植被生态需水并基于此给予一定供水维 持,对维系干旱区绿洲生态系统的可持续发展和退化 生态系统的恢复具有重要的现实意义。【研究进展】 当前,我国在植被生态需水方面已开展了不少研究, 且主要集中在水资源相对匮乏的干旱和半干旱地区 [4-8],如塔里木河流域、黑河流域、石羊河流域等。 这些流域均位于丝绸之路经济带沿线,既是生态环境 脆弱区,也是全球气候变化响应的敏感区,在气候变 化和人类活动双重影响下, 生态环境问题日益突出, 生态隐患也日趋加大。开都-孔雀河流域(以下简称 开-孔河流域)作为塔里木河下游的一个支流域,近 年因人类高强度的水土资源开发,上游田间灌水不断 增加,造成了孔雀河下游河道持续断流,植被严重退 化、土地大范围沙化等系列环境问题,已严重影响到 当地社会经济的可持续发展和生态环境的稳定,经济 与生态矛盾激化,生态危机进一步加剧<sup>[9]</sup>。开展天然 植被生态需水定量研究, 合理分配上下游水资源, 是 解决经济发展用水和生态用水矛盾,促进流域退化生 态系统恢复与生态文明建设的一把金钥匙,同时也是 践行"绿水青山就是金山银山"理念的一种方式。对 于开-孔河流域植被生态需水量的估算,已有不少相 关研究开展。例如李卫红等<sup>[10]</sup>根据雷志栋耗散型水文 模型模拟得出的非灌溉地年净耗水量计算了自然生 态系统的生态需水;张家凤等[11]利用定额法计算了开

收稿日期: 2019-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41561023)

作者简介:杨媛媛(1994-),女。硕士研究生,主要从事干旱区水资源与 环境研究。E-mail: yuanyuan540608@126.com

通信作者: 徐长春(1977-), 女。教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区气候、生态水文和水资源与环境研究。E-mail: xcc0110@163.com

-孔河流域绿地环境需水量;周洪华等<sup>[12]</sup>使用综合定 额法、潜水蒸发法等计算了孔雀河流域天然植被不同 保育目标和保护范围下的生态需水量。已有研究主要 利用定额法和潜水蒸散发法,定额法适用于工作基础 条件较好的地区和人工植被,潜水蒸发法适用于干旱 区植被生存主要依赖于地下水的情况,但其一些参数 计算复杂,需要大量现场试验工作支撑[13],野外工作 量大。【切入点】本研究中使用的蒸散发法,理论上 比较成熟完整,实际上也具有很好的操作性,采用该 方法可以计算获得非理想条件下的植被生态需水量, 且计算精度较高[14],可解决天然植被生态需水计算过 程中当前流域地下水资料缺乏和天然植被工作基础 薄弱的问题。【拟解决的关键问题】本研究主要于孔 雀河流域开展,即开-孔河流域内的博斯腾湖出水口 扬水站以下的部分。基于 2000—2016 年的气象站点 实测数据和土地利用数据,借助遥感与 GIS 技术,采 用已被广泛应用的 FAO56 Penman-Monteith 公式<sup>[15-19]</sup>, 结合干旱强度指数 DSI, 分析流域内天然植被生态需 水量的时空变化特征,并估算不同干、湿状况下天然 植被的生态需水量,旨在为流域内有限水资源的合理 分配和使用、天然植被的保护与恢复以及整个流域的 稳定和可持续发展提供一定科学依据和决策参考。

### 1 研究区概况

孔雀河流域位于新疆维吾尔自治区中部天山以南 的巴音郭楞蒙古自治州境内(85°12′40″—92°19′42″E, 39°40′47″—42°11′48″N),库鲁克塔格山南麓,塔里木 盆地东北缘。孔雀河全长 841 km,流域总面积 11.19×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。流域气候为典型的大陆性干旱气候,多 年平均降水量 62.7 mm,降雨集中在 6—8 月,多年平 均蒸发量 2 773 mm。其特殊的地理位置和气候条件决 定了孔雀河流域生态环境的脆弱性。流域内天然植被主 要分布于各县市农区外围及河流两侧,乔木主要是胡杨, 灌木主要有红柳、黑刺、柽柳等,草本植被则主要有罗 布麻、芦苇、盐生草等,研究区示意图见图 1。



图1 孔雀河流域位置及 DEM 图

Fig.1 Location and DEM of Kongque river basin

2 数据与方法

- 2.1 数据来源与处理
- 2.1.1 遥感数据获取及处理

1) *NDVI* 和 *ET/PET* 数据:分别为 MOD13 *NDVI* 产品和 MOD16 ET/PET 产品,数据详细信息见表 1。

表1 遥感数据信息

Table 1	Information	of Remote	Sensing	Data

产品数据 Product data	空间分辨率 Spatial resolution	时间分辨率 Temporal resolution	数据来源 Data sources
MOD13A2	1 km×1 km	16day	https://lpdaac.usgs.gov/
MOD16A3	1 km×1 km	1 year	https://modis.gsfc.nasa.go

在 MRT(Modis Reprojection Tool)工具、ENVI5.1 和 ArcGIS 10.2 的支持下,对获得的遥感数据进行数 据格式转换、拼接、投影转换及研究区提取等预处理。 对 *NDVI* 数据进行 Savitzky-Golay 滤波和 MVC 合成 处理,以重建 *NDVI* 时间序列平滑曲线,降低噪声干 扰,从而提高数据质量与可信度,获取一年中植被长 势状况最好的 *NDVI* 数据作为年值,形成 2000—2016 年的时间序列数据集。利用 ArcGIS 去除 MOD16 数 据中的无效值,并对 MOD16 *ET/PET* 栅格数据进行 单位换算,得到其真实值,形成 2000—2016年 MOD16 *ET/PET* 数据集。

2) 土地利用数据: 土地利用数据为 2001—2016 年 MCD 12Q1 产品数据 (https://lpdaac.usgs.gov/), 空 间分辨率为 500 m, 结合 Big Map2000—2016 年历史 影像数据 (http://www.bigemap.com/), 使用 ArcGIS 10.2 软件提取获得研究区 2000—2016 年天然植被类 型及面积。

## 2.1.2 气象数据获取及处理

气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),包括新疆 66 个气象站点 2000—2016 年的日 最高气温、日最低气温、日平均风速(2m)、日平均 相对湿度和日照时间等数据。该数据主要用于 Penman-Monteith 陆面蒸散发模型来计算参考作物蒸 散量。由于西北内陆干旱区气象站点稀疏,整个孔雀 河流域仅有 4 个气象站,为提高计算精度,本文计算 了全疆 66 个气象站点的植被参考作物蒸散量,然后 运用 ANUSPLIN 法进行空间插值,获得分辨率为 250m 的全新疆植被参考作物蒸散发格点数据,再依 据孔雀河流域边界提取数值,得到研究区植被参考作 物蒸散量。

#### 2.2 研究方法

### 2.2.1 干旱强度指数 DSI

2013 年 Mu 等<sup>[20]</sup>基于遥感数据,综合考虑了 *NDVI* 与 *ET/PET* 的 2 个基本要素,提出了干旱强度 指数 DSI (Drought Severity Index)。其中, NDVI 主要描述植被的光合作用及生长状态, ET/PET 主要反映植被的水分胁迫状况,通过二者累加能综合反映一个区域的干旱状况。DSI 具体算法如下:

首先,对 NDVI 和 ET/PET 进行标准化。

$$Z_{\rm NDVI} = \frac{R_{\rm NDVI} \cdot \bar{R}_{\rm NDVI}}{\sigma_{\rm NDVI}},$$
(1)

$$Z_{\text{ET/PET}} = \frac{R_{\text{ET/PET}} - \overline{R}_{\text{ET/PET}}}{\sigma_{\text{ET/PET}}},$$
 (2)

式中:  $Z_{\text{NDVI}}$ 为标准化后的 NDVI;  $R_{\text{NDVI}}$ 为 2000—2016 年间某年的 NDVI 值;  $\overline{R}_{\text{NDVI}}$ 为 2000—2016 年 NDVI 的平均值,  $\sigma_{\text{NDVI}}$ 为 NDVI 的方差,  $Z_{\text{ET/PET}}$ 为标准化后 的 ET/PET;  $R_{\text{ET/PET}}$ 为 2000—2016 年间某年的 ET/PET 值;  $\overline{R}_{\text{ET/PET}}$ 为 2000—2016 年 ET/PET 的平均值;  $\sigma_{\text{ET/PET}}$ 为 ET/PET 的方差。

然后,对标准化后的 NDVI 和 ET/PET 进行加和 得到 Z 值,再对 Z 值进行标准化即可得到 DSI。计算 式为:

$$Z = Z_{\text{NDVI}} + Z_{\text{ET/PET}}, \qquad (3)$$

$$DSI = \frac{Z \cdot \overline{Z}}{\sigma_Z},$$
 (4)

式中: Z为 Z 的均值;  $\sigma_Z$ 为 Z 的方差。DSI 值越小表 示干旱程度越强, DSI 值越大则表示干旱程度越弱。 本文参考前人相关研究成果<sup>[21-22]</sup>,依据本研究区 DSI 值分布范围将其划分为 5 个等级并对应不同干旱状 态(表 2)

表 2 DSI 干旱指数等级划分及对应干旱状态

Table 2	Drought	categories	by	drought	severity	index	(DSI)	
---------	---------	------------	----	---------	----------	-------	-------	--

DSI 值 Value of DSI	等级 Grade
≤-1.5	极度干旱 Extreme dry
-1.5< <i>DSI</i> ≤-1.2	重度干旱 High dry
-1.2< <i>DSI</i> ≤-0.3	轻度干旱 Mild dry
-0.3< <i>DSI</i> ≤0.3	正常 Normal
>0.3	湿润 Wet

### 2.2.2 植被生态需水量计算

本文以生长期内植被本身的蒸散量作为主要的 需水量,结合植被类型及其生长区域的土壤含水率来 计算植被生态需水量,流域天然植被总生态需水量采 用面积定额法来计算。计算式为:

$$W = \Sigma W_i = \Sigma W_i \times A_i = ET_i \times 10^{-3} \times A_i, \tag{5}$$

式中: W 为植被生态需水量总和 (m<sup>3</sup>); W<sub>i</sub>和 w<sub>i</sub>分别 为第 i 类植被对应的生态需水量 (m<sup>3</sup>)和单位面积的 生态需水量 (m<sup>3</sup>); A<sub>i</sub>为第 i 类植被的面积 (m<sup>2</sup>);  $ET_i$ 为生长季内的生态需水定额 (mm),其计算式为:

$$ET_i = K_s \cdot K_c \cdot ET_0 , \qquad (6)$$

式中:  $K_s$ 为土壤水分系数;  $K_c$ 植物系数;  $ET_0$ 为参考 作物蒸散量 (mm)。

### 1)参考作物蒸散量 ET<sub>0</sub>的计算

采用世界粮农组织 FAO 推荐 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量。计算式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_{\rm n}-G) + \gamma \frac{900}{T+273}U_2(e_{\rm s}-e_{\rm a})}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)}, \qquad (7)$$

式中:  $ET_0$  为参考作物蒸散量 (mm/d);  $R_n$  为地表净 辐射量(MJ/(m<sup>2</sup> d)); G 为土壤热通量(MJ/(m<sup>2</sup> d)); y 为湿度计常数 (kPa/C);  $\Delta$  为饱和水汽压与温度关 系曲线斜率 (kPa/C); T 为空气平均温度 (C);  $U_2$ 为 2 m 高处的风速 (m/s)。 $e_s$  为饱和水汽压 (kPa);  $e_a$ 实际水汽压 (kPa); ( $e_s$ - $e_a$ ) 为饱和水汽压与实际水 汽压之差,即水汽压亏缺 (kPa)。

#### 表3 植物系数 Kc值

Table 3 Values of plant  $K_c$  coefficient

植被类型 Vegetation types	4月 Apr.	5 月 May.	6 月 June	7 月 July	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.
草地 Grassland	0.2	0.45	0.875	1.05	1.05	0.915	0.78
林地 Forestland	0.2	0.43	0.66	0.96	0.96	0.75	0.1

表 4 2000—2016 年孔雀河流域天然植被面积 Table 4 Natural vegetation area of Kongque river

basin from 2000 to 2016

Year $(\times 10^4 hm^2)$ $(\times 10^4 hm^2)$ 20002.3935.4620012.3835.3420022.4034.8820031.7935.0120041.8034.8620051.7834.9820061.8134.7820071.7734.0120081.2734.1720091.2634.9220101.2834.0220111.2633.0520121.2632.99	年份	林地面积 Forestland area/	草地面积 Grassland area/
20002.3935.4620012.3835.3420022.4034.8820031.7935.0120041.8034.8620051.7834.9820061.8134.7820071.7734.0120081.2734.1720091.2634.1220101.2834.0220111.2633.0520121.2632.99	Year	$(\times 10^{4} hm^{2})$	$(\times 10^4 hm^2)$
20012.3835.3420022.4034.8820031.7935.0120041.8034.8620051.7834.9820061.8134.7820071.7734.0120081.2734.1720091.2634.1220101.2834.0220111.2633.0520121.2632.99	2000	2.39	35.46
2002       2.40       34.88         2003       1.79       35.01         2004       1.80       34.86         2005       1.78       34.98         2006       1.81       34.78         2007       1.77       34.01         2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.02         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2001	2.38	35.34
2003       1.79       35.01         2004       1.80       34.86         2005       1.78       34.98         2006       1.81       34.78         2007       1.77       34.01         2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.02         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2002	2.40	34.88
2004       1.80       34.86         2005       1.78       34.98         2006       1.81       34.78         2007       1.77       34.01         2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.02         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2003	1.79	35.01
2005       1.78       34.98         2006       1.81       34.78         2007       1.77       34.01         2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.12         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2004	1.80	34.86
2006       1.81       34.78         2007       1.77       34.01         2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.12         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2005	1.78	34.98
2007       1.77       34.01         2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.12         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2006	1.81	34.78
2008       1.27       34.17         2009       1.26       34.12         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2007	1.77	34.01
2009       1.26       34.12         2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2008	1.27	34.17
2010       1.28       34.02         2011       1.26       33.05         2012       1.26       32.99	2009	1.26	34.12
2011     1.26     33.05       2012     1.26     32.99	2010	1.28	34.02
2012 1.26 32.99	2011	1.26	33.05
	2012	1.26	32.99
2013 1.23 32.92	2013	1.23	32.92
2014 1.23 32.96	2014	1.23	32.96
2015 1.23 32.90	2015	1.23	32.90
2016 1.23 33.60	2016	1.23	33.60

2) 植物系数 K<sub>c</sub>与土壤水分系数 K<sub>s</sub>的确定

植物系数K<sub>c</sub>是指不同生长期内植物的生态需水量 与参考作物蒸散量的比值。本研究中将天然植被的类 型划分为林地和草地。由于各类林草植被在群落结构 和外貌特征等方面存在着较大差异,因此植被类型和 生长状况对植被各自的参考作物需水量影响较大。本 文参考相关学者关于新疆植被生态需水量的研究<sup>[23]</sup>, 确定了本流域内的植物系数*K*。值(表3)。研究区内乔 木与灌木交错、混合生长,为此将灌木与乔木统一划 分为天然林地,天然林地的植物系数取值为乔木和灌 木植物系数的均值。流域内天然植被面积具体见 (表4)。

土壤水分系数 K<sub>s</sub>与不同类型的土壤含水率相关, 它用来表示土壤水分胁迫对植被蒸散发的影响,一般 采用 Jensen 公式来确定土壤水分供应不足时植被的 实际蒸散量随土壤含水率的变化情况<sup>[24]</sup>。参照已有研 究<sup>[23]</sup>,本文中土壤水分系数 K<sub>s</sub>取值为 0.358。

# 3 结果与分析

### 3.1 干旱过程监测

利用 2000—2016 年 NDVI 与 ET/PET 数据集构建 DSI 指数,用于监测孔雀河流域 2000-2016 年干旱 过程。从 DSI 监测结果看 (图 2), 孔雀河流域干湿 状况时空变异性大。2005 年以前流域主要处于干旱 状态,多数地区 DSI 值小于-0.3,特别是 2001、2002 年, DSI 值低至-3.05~-2.15, 出现严重的干旱状况; 2005年之后流域主要处于湿润状态,大部分地区 DSI 大于 0.3: 从空间上看, 干旱主要发生在平原绿洲区, 当库尔勒市周边发生干旱时, 尉犁县周边也发生干旱, 具有一致性。将 2000—2016 年孔雀河流域干湿面积 作一元线性回归分析(图 3),分析流域干、湿状况 随时间变化的总体特征。研究发现,2000-2016 年 间流域内干湿面积变化波动较大。其中,干旱面积整 体上呈下降趋势, 变化速率为-127.38×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a; 几 种干旱状况表现为:极度干旱(-49.892×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a) > 轻度干旱(-47.034×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a)>重度干旱(-30.453×10<sup>4</sup> km²/a); 过去 2000—2016 年孔雀河流域正常和湿润程 度逐渐增强,极度和中度干旱程度逐渐减弱。2002 年是最为干旱的年份,达到极度干旱,2004 年之后 干旱程度有所缓解,至 2010 年湿润面积达到最大, 其后基本保持一个较高位的湿润状态。相比较,湿润 面积整体上呈明显上升趋势,变化速率为111.25×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a。依据 DSI 干旱指数等级划分,各年份干湿状 况如表5所示。有8a为湿润年,5a为轻度干旱年, 2 a 为极度干旱年, 2 a 为正常年, 这说明研究区 2000-2016年总体湿润状况较好,环境有改善趋势, 但干旱仍时有发生。







表 5 孔雀河流域 2000-2016 年干湿状况

basin from 2000 to 2016

等级 Grade	年份 Year
极度干旱 Extreme dry	2001、2002
重度干旱 High dry	/
轻度干旱 Mild dry	2000、2003、2004、2006、2014
正常 Normal	2007、2009
아프 201 <b>XX</b> 7	2005、2008、2010、2011、2012、2013、
涩润 Wet	2015、2016

Table.5 Dry and wet conditions of Kongque river

# 3.2 生态需水量变化特征

### 3.2.1 生态需水量的时间变化特征

由于山区地带性植被的生态需水为不可控用水 范围,而中部平原绿洲区和下游荒漠区的生态需水属 可控用水范围。因此,本文计算分析的天然植被生态 需水主要为后二者。

图 4 为研究区生长季(4—10 月)天然植被生态 需水总量的年际变化。由图 4 可知,流域内天然植被 生长季生态需水总量的多年平均值为 7.575 7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 其中草地需水多年平均值为 7.090 3×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,林地需 水多年平均值为 0.485 4×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,草地需水占总量的 93.59%,明显高于林地。从长期趋势看,天然植被生 长季生态需水总量呈显著减少趋势 (*P*<0.05),变化 速率为-0.030 9×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,其中,草地变化率为 -0.009×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,林地变化率为-0.021 9×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,林 地减少趋势明显大于草地。



图 4 2000-2016 年孔雀河流域生长季天然植被生态需水总量年际变化

#### Fig.4 Changes of total ecological water requirement of natural vegetation in growing season from 2000 to 2016

表 6 为生长季内天然植被各月的生态需水量。由 表 6 可以看出,4—7 月为需水增长期,7 月达到峰值, 7—10 月为需水减少期,这与植物的生长周期规律相 一致。草地需水在各月中的占比均最高,且在整个生 长季内变化幅度较大,7 月需水量最大(1.921 2×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>), 8 月次之(1.730 7×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>),4 月和 10 月最低林地在整 个生长季内需水变化较为平稳,各月差异较小,7—8 月需水最大月也仅为 0.117 8×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。从需水总量来 看,研究区天然植被的生态需水主要集中在 6—8 月, 占整个生长季全部需水的 69.64%,其中林、草地各 自占比分别为 66.36%、69.86%。草地的生长季始期 需水量要远大于末期,而林地的生长季始期需水量要 稍高于末期,这充分反映了不同植被类型在生长季不 同时期对水的需求程度的差异。

水量
水重

	Table 6 Eco	cological water requirement of different natural vegetation in growing season						$10^{8} \text{m}^{3}$
植被类型	4 月	5 月	6月	7 月	8月	9月	10 月	스라 Total
Vegetation types	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	
草地 Grassland	0.295 5	0.803 2	1.301 7	1.921 2	1.730 7	0.962 1	0.075 9	7.090 3
林地 Forestland	0.016 6	0.047 4	0.097 2	0.117 8	0.107 0	0.066 1	0.033 2	0.485 4
合计 Total	0.312 1	0.850 6	1.399 0	2.039 0	1.837 7	1.028 2	0.109 2	7.575 7

3.2.2 生态需水量的空间变化特征

由图 5 可知,流域内天然植被生态需水主要集中 在库尔勒—尉犁平原绿洲区。在西北干旱区,水是决 定植被分布的关键因素。以 2000、2005、2010、2015 年为例,得到孔雀河流域 4 期天然植被的生态需水量, 空间上主要分布在绿洲农区外围和河流二侧,占整个 流域天然植被生态需水总量的 89.50%。流域中游(普 惠水库至阿克苏甫水库段)和下游(阿克苏甫水库段 以下至罗布泊段)天然植被年生长季单位面积生态需 水明显大于上游;山区低于中部平原绿洲区;河流二 侧的天然植被以乔木(主要是胡杨)和灌木为主,其 单位面积生态需水远大于草地单位面积生态需水。





Fig.5 Spatial distribution of ecological water requirement of natural vegetation in kongque river basin







图 6 直观地反映了孔雀河流域 2000—2016 年天 然植被生态需水的时空变化情况。2000—2005 年的

变化剧烈程度明显要小于 2005—2010 年和 2010— 2015 年,后 2 个时期内,流域内天然植被的斑块数 明显减少,且库尔勒市周围天然植被的斑块数量减少 幅度大于尉犁县周围,导致了流域内植被生态需水量 减少。2000—2016 年来,西北部山区单位面积年生 长季生态需水主要以增加为主,增加幅度介于 0~150 mm之间;平原绿洲区单位面积年生长季生态需水较 为复杂,农区附近以减少为主,减少幅度介于 150~300 mm,河流二侧林地在中、上游以增加为主,在下游 初始段以减少为主,而下游荒漠区分布有大片沙漠和 戈壁,变化值为 0。总之,2000—2016 年生态需水的 变化主要受平原绿洲区影响,下游荒漠区和山区影响 较小。

3.2.3 不同干、湿状况下的生态需水量计算

依据不同干、湿年份(表5)计算孔雀河流域天 然植被单位面积的生态需水量均值(表7)。由表7可 知,在同样干湿状况下,单位面积的林地需水要高于 草地;而从不同干湿状况看,林地和草地的单位面积 需水均呈现以下相同特征,正常年>湿润年>轻度干旱 年>极度干旱年。

表7 不同干湿状况下天然植被单位面积生态需水量

Table 7 Ecological water requirement of natural vegetation in

various dry and wet conditions							
干、湿状况	草地	林地					
Dry and wet conditions	Grassland	Forestland					
极度干旱年 Extreme dry year	239.43	292.59					
轻度干旱年 Mild dry year	245.50	295.82					
正常年 Normal year	252.92	309.83					
湿润年 Wet year	248.37	307.15					

尽管林地的单位面积需水要高于草地,但从分布 面积的绝对值看,草地的总需水量要远高于林地,即 使在不同的干湿条件下(表8)。2000—2016年,流域 天然植被需水总量年均值为7.5757×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,其中,极 度干旱年、轻度干旱年、正常年、湿润年的生态需水 年均值分别为 7.763 9×10<sup>8</sup>、7.644 4×10<sup>8</sup>、7.708 2×10<sup>8</sup>、 7.575 7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>; 对应天然草地生态需水量分别为  $7.0592 \times 10^8$ ,  $7.1096 \times 10^8$ ,  $7.2290 \times 10^8$ ,  $7.0903 \times 10^8 \text{m}^3$ ; 对应天然林地生态需水量分别为 0.704 7×10<sup>8</sup>、 0.534 9×10<sup>8</sup>、0.479 3×10<sup>8</sup>、0.485 4×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。生长 季内,无论何种干湿状况,植被生态需水均遵从7 月最多,8月次之,6月略低,4月和10月最少的规 律,6—8月为植被生态需水旺季。不同干湿状况下 相比较,草地在需水旺季的需水量表现为正常年 (5.059 5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)>轻度干旱年(4.970 1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)>极 度干旱年(4.9263×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)>湿润年(4.9236×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>), 占天然植被整个生长季生态需水的比例分别为

65.63%、65.02%、63.45%、66.06%;林地在需水旺 季时的需水以极度干旱年(0.4691×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)>轻度干 旱年(0.354 7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)>正常年(0.318 5×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)> 表 8 2000\_2016年不同干温壮况下天然植被生态雲水量

湿润年(0.2662×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)逐次降低,所占比例分别为 6.04%、4.64%、4.13%、3.57%。气象因子导致的干 湿状况差异是决定植被生态需水差异的主要因素。

 $10^{8} m^{3}$ 

衣 0	2000-	-2010 千小四千	迎风儿	下入公位	1. 伮 土 心 而	小里

	Table 8 Ecologic	al water red	quirement of v	vegetation in 1	Kongque rive	r basin from	2000 to 2016	5	$10^{8}m^{3}$
干、湿状况 Dry and wet conditions	植被类型 Vegetation types	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8月 August	9月 September	10 月 October	合计 Total
	草地 Grassland	0.280 4	0.818 1	1.338 7	1.853 5	1.734 2	0.957 3	0.077 2	7.059 2
极度干旱年 Extreme dry year	林地 Forestland	0.022 8	0.069 4	0.144 0	0.164 3	0.160 8	0.094 6	0.048 9	0.704 7
Lindenie alf year	合计 Total	0.303 2	0.887 4	1.482 7	2.017 8	1.895 0	1.051 9	0.126 1	7.763 9
	草地 Grassland	0.293 4	0.799 7	1.293 0	1.931 3	1.745 8	0.970 9	0.075 4	7.109 6
轻度干旱年 Mild dry year	林地 Forestland	0.018 3	0.051 9	0.106 1	0.130 7	0.117 9	0.073 7	0.036 3	0.534 9
wind dry year	合计 Total	0.311 7	0.851 7	1.399 1	2.062 0	1.863 7	1.044 6	0.1117	7.644 4
	草地 Grassland	0.306 1	0.824 1	1.362 1	1.932 8	1.764 7	0.960 2	0.079 2	7.229 0
正常年 Normal year	林地 Forestland	0.016 7	0.047 2	0.098 1	0.115 4	0.105 0	0.063 7	0.033 3	0.479 3
	合计 Total	0.322 8	0.871 3	1.460 2	2.048 2	1.869 6	1.023 8	0.112 5	7.708 2
	草地 Grassland	0.295 5	0.803 2	1.301 7	1.921 2	1.730 7	0.962 1	0.075 9	7.090 3
湿润年 Wet year	林地 Forestland	0.016 6	0.047 4	0.097 2	0.117 8	0.107 0	0.066 1	0.033 2	0.485 4
wei yeai	合计 Total	0.312 1	0.850 6	1.399 0	2.039 0	1.837 7	1.028 2	0.109 2	7.575 7

表9 不同干湿状况下流域内(库尔勒站及其周边气象站点)各气象因子比较

Table 9 Comparison of meteorological factors in the basin (Korla station and its

surrounding meteorological stations) under different wet and dry conditions

气象因子	气象站点	极度干旱年	轻度干旱年	正常年	湿润年
Meteorological factor	Meteorological station	Extreme dry year	Mild dry year	Normal year	Wet year
平均风速 Average wind speed / m/s	库尔勒 Korla	2.90	2.53	2.17	2.26
	焉耆 Yanqi	1.77	1.89	2.09	1.95
	铁干里克 Tikanlike	1.56	1.81	2.06	1.96
日最高气温 Daily maximum temperature / ℃	库尔勒 Korla	28.07	27.68	28.26	28.06
	焉耆 Yanqi	26.09	25.69	26.62	26.40
	铁干里克 Tikanlike	30.04	29.73	30.61	30.28
平均相对湿度 Average relative humidity / %	库尔勒 Korla	40.92	38.08	34.29	36.79
	焉耆 Yanqi	52.81	52.85	48.27	50.48
	铁干里克 Tikanlike	45.03	39.99	34.26	36.28
日照时间 Hours of sunshine / h	库尔勒 Korla	7.87	8.79	9.19	9.32
	焉耆 Yanqi	8.98	9.35	10.22	9.20
	铁干里克 Tikanlike	7.88	8.44	8.97	9.02

# 4 讨 论

从不同干湿状况下天然植被的生态需水来看,孔 雀河流域天然植被单位面积生态需水呈现正常年>湿 润年>轻度干旱年>极度干旱年。理论上气候越干旱, 植被需水量越大,文中计算结果与理论值出现差异, 可能是因为不同干湿状况下参考作物蒸散发不同。参 考作物蒸散发是指在一定气象条件下,水分供应不受 限制时某一固定下垫面可能达到的最大蒸散发量。一

个地区参考作物蒸散发的变化同时受到大尺度天然 因素变化和区域气候特性变化的共同影响,日照时间、 风速以及温度等因子与参考作物蒸散发正相关,而相 对湿度因子与之呈负相关[25-26]。以孔雀河流域内库尔 勒气象站点及其周边站点为例,由表9可知,库尔勒 站干旱年植被生长季内平均风速大于湿润年和正常 年, 焉耆站和铁干里克站湿润年、正常年的平均风速 大于干旱年,但3个站点干旱年日照时间均值和日最 高气温均值均小于正常年和湿润年,干旱年相对湿度

均值大于正常年和湿润年的相对湿度均值(湿润年由 于上游人为输水,植被长势好,湿润面积较大,在气 象上仍然较为干旱,其相对湿度小于干旱年),这些 气象因子共同作用导致了干旱年参考作物蒸散量小 于湿润年和正常年。因此,流域内湿润年份参考作物 蒸散量大于极度干旱年参考作物蒸散量,导致正常年、 湿润年植被单位面积生态需水大于极度干旱年和轻 度干旱年。

2000—2016 年天然植被生态总量呈下降趋势, 天然植被需水量减少的可能原因为: 2000—2016 年 来流域内农田开垦规模不断扩大,耕地面积不断增加, 垦荒过程中天然植被遭到破坏,面积不断减少。过度 开垦挤占天然植被生态用水,导致大片胡杨枯死和草 地退化。2000—2016 年,天然林、草地面积均呈减 少趋势,其中,草地面积减少了1.86×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,林地 面积减少了1.16×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>,直接影响天然植被生态需 水量的变化,导致天然植被生态需水量减少。

# 5 结 论

1)基于 NDVI 和 ET/PET 数据集构建的 DSI 指数 显示,近 2000—2016 年孔雀河流域干湿状况时空变 异较大。2005 年以前,流域主要处于干旱状态,多 数地区 DSI 值小于-0.3,2001、2002 年出现严重干旱。 2005 年以后,大多数年份流域处于湿润状态,2010 年达到峰值。总体来看,湿润面积呈上升趋势 (111.25×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a),干旱面积呈下降趋势 (-127.38×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a),几种干旱程度相比较,极度干 旱(-49.892×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a)>轻度干旱(-47.034×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a) >重度干旱(-30.453×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>/a)。

2)受人类活动和气候变化的共同影响,2000— 2016年孔雀河流域天然植被生长季生态需水总量以 2006年为分界点整体上呈现先上升后下降的波动趋势。天然草地生态需水占主导,占总天然植被生态需 水的93.59%,但其变化趋势较林地要小。生长季内, 天然林、草的生态需水主要集中在 6—8月,草地的 生长季始期需水远大于末期,林地的生长季始期需水 稍小于末期。孔雀河流域天然植被生态需水主要集中 在绿洲区的农区外围及河流中、上游的二侧。

3)相同干湿条件下,单位面积的天然林地需水高于草地;不同干湿条件下,林地和草地单位面积生态需水均表现出相同特征,即:正常年>湿润年>轻度干旱年>极度干旱年。结合分布面积,研究区草地需水总量大于林地。

4) 2000—2016年,研究区天然植被需水总量年 均值为 7.575 7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,其中极度干旱年、轻度干旱 年、正常年、湿润年分别为 7.763 9×10<sup>8</sup>、7.644 4×10<sup>8</sup>、 7.708 2×10<sup>8</sup>、7.575 7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。生长季内,无论何种干 湿状况,植被生态需水均遵从 7 月最多,8 月次之, 6 月略低,4 月和 10 月最少的规律。

5) 气候因子的变化和天然植被面积的变化导致 了流域天然植被生态需水量的差异。

#### 参考文献:

- 陈亚宁,李卫红,徐海量,等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响
   [J]. 地理学报,2003,58(4):542-549.
   CHEN Yaning, LI Weihong, XU Hailiang, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim river, China[J].
   Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 542-549.
- [2] 叶朝霞,陈亚宁,李卫红.基于生态水文过程的塔里木河下游植被 生态需水量研究[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 451-461.
   YE Zhaoxia, CHEN Yaning, LI Weihong. Ecological water demand of vegetation based on eco-hydrological processes in the lower reaches of Tarim river[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(5): 451-461.
- [3] 白元,徐海量,张青青,等.基于地下水恢复的塔里木河下游生态需水量估算[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 630-640.
  BAI Yuan, XU Hailiang, ZHANG Qingqing, et al. Evaluation on ecological water requirement in the lower reaches of Tarim River based on groundwater restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 630-640.
- [4] 韩桂兰,孙建光. 塔里木河流域天然植被生态水权及其计量研究[J]. 统计与信息论坛, 2014, 29(6): 102-106.
  HAN Guilan, SUN Jianguang. Research on ecological water right of natural plant and its measurement in Tarim river basin[J]. Statistics & Information Forum, 2014, 29(6): 102-106.
- [5] 孙栋元,胡想全,金彦兆,等.疏勒河中游绿洲天然植被生态需水量 估算与预测研究[J].干旱区地理,2016,39(1):154-161. SUN Dongyuan, HU Xiangquan, JIN Yanzhao, et al. Prediction and evaluation of ecological water requirement of natural vegetation in the middle reaches oasis of Shulehe River Basin[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 154-161.
- [6] 白元,徐海量,凌红波,等. 塔里木河干流区天然植被的空间分布及 生态需水[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1 410-1 416.
  BAI Yuan, XU Hailiang, LING Hongbo, et al. Spatial distribution characteristics and ecological water requirement of natural vegetation along the mainstream of the Tarim river[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(5): 1 410-1 416.
- [7] 张丽,董增川.黑河流域下游天然植被生态需水及其预测研究[J].
   水利规划与设计,2005(2):44-47,87.

ZHANG Li, DONG Zengchuan. Prediction and ecological water requirement of natural vegetation in the middle reaches oasis of Heihe River Basin[J]. Water Resources Planning and Design, 2005(2): 44-47, 87.

- [8] 赵文智,常学礼,何志斌,等.额济纳荒漠绿洲植被生态需水量研究
  [J].中国科学.D辑:地球科学,2006,36(6):559-566.
  ZHAO Wenzhi, CHANG Xueli, HE Zhibin, et al. Research on vegetation ecological water demand in Ejina Desert Oasis[J]. Scientia Sinica : Terrae, 2006, 36(6): 559-566.
- [9] 吾买尔江•吾布力,李卫红,朱成刚,等.新疆孔雀河流域生态退化问题与保护恢复研究[J]. 新疆环境保护, 2017, 39(1): 8-12.
  WUMAIERJIANG•WUBULI, LI Weihong, ZHU Chenggang, et al. Research on ecological degradation, protection and restoration of peacock river basin, Xinjiang[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2017, 39(1): 8-12.
- [10] 李卫红,陈忠升,李宝富,等.新疆开都-孔雀河流域绿洲需水量与稳定性分析[J].冰川冻土,2012,34(6):1470-1477.
  LI Weihong, CHEN Zhongsheng, LI Baofu, et al. Analysis of water demand and stability for oasis in kaidu-Kongque river basin, southern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012,

34(6): 1 470-1 477.

- [11] 张家凤,陈亚宁,李卫红,等.开都河-孔雀河流域水资源需求分析
  [J].新疆农业科学, 2011, 48(10): 1 929-1 935.
  ZHANG Jiafeng, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. The demand analysis of water resources in Kaidu river—Kongque river drainage basin[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(10): 19 29-1 935.
  [12] 周洪华, 吾买尔江•吾布力, 郝兴明,等. 孔雀河流域天然植被生态
- [12] 两次中,百文尔正百师方,师大乐,中、卫霍西加强大派性政卫家 需水量估算[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 140-144. ZHOU Honghua, WUMAIERJIANG•WUBULI, HAO Xingming, et al. Estimation of ecological water demand of natural vegetation in konqi river basin[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 140-144.
- [13] 郭巧玲,杨云松,陈志辉,等.额济纳绿洲植被生态需水及其估算
  [J].水资源与水工程学报,2010,21(3):80-84.
  GUO Qiaoinga, YANG Yunsongb, CHEN Zhihui, et al. Ecological water requirements of vegetation in Ejina oasis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(3): 80-84.
- [14] 胡广录,赵文智.干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J]. 生态学报,2008,28(12):6282-6291.
  HU Guanglu, ZHAO Wenzhi. Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6282-6291.
- [15] 尹春艳,陈小兵,刘虎,等.黄河三角洲参考作物腾发量计算方法适 宜性研究[J].灌溉排水学报,2017,36(6):36-41,108.
  YIN Chunyan, CHEN Xiaobing, LIU Hu, et al. Comparison of different methods for calculating evapotranspiration of crops in the Yellow River Delta[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(6): 36-41, 108.
- [16] 张丽,李丽娟,梁丽乔,等. 流域生态需水的理论及计算研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 307-312.

ZHANG Li, LI Lijuan, LIANG Liqiao, et al. Progress on the research of

theory and calculation method of ecological water requirement[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 307-312.

- [17] 王玉娟, 王树东, 杨胜天, 等. 黄河流域植被生态用水过程动态模拟
  [J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 431-440.
  WANG Yujuan, WANG Shudong, YANG Shengtian, et al. Dynamic simulation of vegetation eco-water of the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 431-440.
- [18] 史超,夏军,佘敦先,等. 气候变化下汉江上游林地植被生态需水量的时空演变[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 580-589.
  SHI Chao, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Temporal and spatial variation of ecological water requirement of forests in the upper reaches of the Hanjiang basin under climate change[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4): 580-589.
- [19] 杨丽,林鹏飞,刘苗苗,等. 新疆博斯腾湖流域气候变化对参考作物 蒸散发影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S1): 80-86. YANG Li, LIN Pengfei, LIU Miaomiao, et al. Influence of climate change on reference crop evapotranspiration in Bosten lake basin, Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S1): 80-86.
- [20] MU Q Z, ZHAO M S, KIMBALL J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(1): 83-98.
- [21] 黄健熙,张洁,刘峻明,等.基于遥感 DSI 指数的干早与冬小麦产量 相关性分析[J].农业机械学报,2015,46(3):166-173.
  HUANG Jianxi, ZHANG Jie, LIU Junming, et al. Correlation analysis between drought and winter wheat yields based on remotely sensed drought severity index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 166-173.
- [22] 余慧倩,张强,孙鹏,等. 干早强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 87-102.
  YU Huiqian, ZHANG Qiang, SUN Peng, et al. Impacts of drought intensity and drought duration on winter wheat yield in five Provinces of North China plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 87-102.
- [23] 姜亮亮. 玛纳斯河流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究[D]. 石河子:石河子大学, 2014.

JIANG Liangliang. Study on the response relationship between ecological water requirement and landscape pattern in the Manas River Basin [D]. Shihezi : Shihezi University, 2014.

- [24] 王玉娟,杨胜天,刘昌明,等. 植被生态用水结构及绿水资源消耗效用: 以黄河三门峡地区为例[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 74-84.
  WANG Yujuan, YANG Shengtian, LIU Changming, et al. The analysis on the pattern of eco-water use of vegetation and the availability of green water in Sanmenxia area of Yellow River[J]. Geographical Research, 2009, 28(1): 74-84.
- [25] 李迎,吕谋超,张海文,等.参考作物蒸散量对气象要素的敏感性分析[J]. 灌溉排水学报,2017,36(7):94-99.

LI Ying, LYU Mouchao, ZHANG Haiwen, et al. Sensitivity analysis of

the reference crop evapotranspiration to meteorological factors[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 94-99.

[26] 韩松俊,胡和平,杨大文,等. 塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散 发的不同变化及影响因素[J]. 中国科学(E 辑:技术科学), 2009, 39(8):1 375-1 383. Han Songjun, Hu Heping, Yang Dawen, et al. Differences in changes of potential evaporation in the mountainous and oasis regions of the Tarim Basin, Northwest China[J]. Science in China Series (E: Technological Sciences), 2009, 39(8): 1 375-1 383.

# Estimation of Ecological Water Requirement for the Natural Vegetation in the Kongque River Basin based on Vegetation Evapotranspiration

YANG Yuanyuan<sup>1, 2</sup>, XU Changchun<sup>1, 2\*</sup>, LUO Yingxue<sup>1, 2</sup>, YANG Qiuping<sup>1, 2</sup>, CHEN Li<sup>1, 2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2.Key Laboratory of Oasis

Ecology under Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** [Objective] Ouantitative ecological water requirement of natural vegetation provides scientific basis and reference for rational allocation and use of limited water resources in basin. [Method] Using FAO56 Penman-Monteith formula and the drought intensity index (DSI), the spatio-temporal variation characteristics of ecological water requirement of natural vegetation in Kongque River basin, Xinjiang from 2000 to 2016 were analyzed and the ecological water requirement of natural vegetation under different dry and wet conditions was calculated. [Result] (1) The average annual ecological water requirement of the natural vegetation growing season in the study area is 7.575  $7 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, and the water demand of natural grassland exceeds that of natural forest land. ②From the perspective of time, the total ecological water requirement in the natural vegetation growing season in the last 17 years shows a rising-falling trend as a whole and the demarcation point occurs in 2006. As for the variation characteristics of the growing season, the ecological water requirement of the natural vegetation in the study area is mainly concentrated in June-August, accounting for 69.64% of the total water requirement in the main growing season of the vegetation. From the From the perspective of space, the ecological water requirement of the natural vegetation in the Kongque River Basin is mainly concentrated in the periphery of the agricultural area in the oasis and on both sides of the middle and upper reaches of the river. ③Under different dry and wet conditions, the average ecological water requirement per unit area of natural forest land and grassland shows the following rules: normal year > wet year > mild dry drought year > extreme drought year. The total amount of natural vegetation ecological water requirement shows: extreme drought years>normal years> mild drought years> wet years. [Conclusion] There are differences in the ecological water requirement of natural vegetation under different dry and wet conditions, and the change of climate factors and natural vegetation area is the main factor leading to the difference of ecological water requirement.

Key words: Penman-Monteith; ecological water requirement; natural vegetation; Kongque river

责任编辑:韩洋