

塔里木河流域最大灌溉面积与超载情况探讨*

郭宏伟^{1,2}, 徐海量¹, 赵新风¹, 凌红波¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于塔里木河流域水资源量及利用水平资料, 结合《塔里木河流域工程与非工程措施五年实施方案》, 通过 Mann-kendall 单调趋势检验及未来趋势变化 Hurst 指数检验分析了近 20 年来塔里木河流域耕地面积变化特征, 计算探讨了该流域现状水平年(2010年)以及规划年(2020年)可承载的最大灌溉面积、现状水平年灌溉面积超载情况、不同来水频率下规划年规划灌溉面积超载和生态水保证情况。结果表明: ① 1990-2010年流域耕地面积显著增加, 且在未来一段时间将持续增加。② 现状水平年流域可承载最大灌溉面积为 129.06 万 hm^2 , 除和田河外其它均超载, 超载面积共计 43.33 万 hm^2 。③ 规划年在 25% 来水频率下, 除了开都-孔雀河流域其他均不超载, 但是相等规划灌溉面积在枯(特枯)水期会出现超载现象, 规划灌溉面积的制定还要参照枯(特枯)水期流域能承载的最大灌溉面积; 在 50%、75% 及 90% 来水频率下, 流域规划灌溉面积超载严重, 管理部门应认识到灌溉面积规划中存在的问题, 提出更加科学的规划方案。④ 在 25%、50%、75% 及 90% 等 4 种来水频率下 2020 年流域生态水分别可保证 95.7%、81.2%、61.4%、44.2%, 表明在规划年的枯水期生态水供应有一定压力。本研究为遏制塔里木河流域自然生态和环境恶化趋势提供了基础依据, 对流域以水资源量来定人工绿洲规模、优化水资源利用规划与配水制度意义重大。

关键词: 塔里木河流域; 最大灌溉面积; 超载面积; 不同来水频率

中图分类号: S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)02-0140-11

The maximum irrigation area and overload situations of the mainstream of Tarim river basin

GUO Hongwei^{1,2}, XU Hailiang¹, ZHAO Xinfeng¹, LING Hongbo¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 831400, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The changes of cultivated land area in the Tarim River Basin in recent years were analyzed with Mann-kendall monotonic trend test and future trend change Hurst index based on water resources quantity and water resources utilization level data in Tarim River Basin and combined with the *Measures of Tarim River Basin Project and Non-project Implementation Plan for Five Year*. The following factors were calculated for four source streams and mainstream of the Tarim River Basin: maximum irrigation area in 2010 and 2020, irrigation area overload situations in 2010, planning irrigation area overload situations and ecological water guarantee situations at different runoff frequencies in 2020. The results showed that: ① The cultivated land area increased significantly during 1990-2010, and it will keep increasing in the following years. ② The maximum irrigation area of the Tarim River basin in 2010 is $129.06 \times 10^4 \text{hm}^2$.

* 收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(31400466, 30970549, 41471099); 水利部公益性行业科研专项基金(201501060)

作者简介: 郭宏伟(1991年生), 男; 研究方向: 恢复生态学; E-mail: ghwxzsy@163.com

通信作者: 赵新风(1981年生), 女; 研究方向: 恢复生态学; E-mail: zxinfeng668@sina.com

All basins except for the Hotan River Basin are overloaded, and total overload area is $43.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$. ③ In 2020, all basins except for Kai-Kong River Basin are not overloaded at 25% runoff frequency, but equal planning irrigation area will be overloaded in dry season. The formulation of planning irrigation area should refer to the maximum irrigation area that the basin can carry in dry season; planning irrigation area of the basin is seriously overloaded at 50%, 75% and 90% runoff frequency, respectively, so management department should recognize the problems in planning irrigation area and put forward more scientific planning schemes. ④ Guarantee rates of ecological water in the basin at water frequencies of 25%, 50%, 75% and 90% are 95.7%, 81.2%, 61.4%, 44.2%, respectively, suggesting that in the planning year there is a certain pressure on the ecological water supply during the dry season. This study provides a basis for the containment of the ecological and environmental deterioration of the Tarim River Basin, and it is also significant for the determination of artificial oasis scale of the basin according to the water resources quantity, optimization of water resource utilization planning and water distribution.

Key words: Tarim River Basin; maximum irrigation area; overloading problem; different runoff frequencies

塔里木河流域是中国乃至世界生态最为脆弱的地区之一。流域气候干旱, 降水稀少, 属于典型的暖温带大陆性气候, 年均气温 $10.6 \sim 11.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 年均降水量大约为 $116.8 \text{ mm}^{[1-2]}$ 。近年来降水则在流域源流区及干流都有增加趋势。流域水资源的形成以冰雪融水补给为主, 并有降雨径流加入, 各河流均以河流出山口为界, 出山口以上为径流形成区, 径流量沿程递增; 河流出山以后, 沿程渗漏、蒸发, 用于灌溉、流入湖泊或盆地, 径流量沿程递减, 最后消失于湖泊、灌区或沙漠中^[3-4]。流域多年平均水资源总量为 430.2 亿 m^3 。自 20 世纪 80 年代末尤其进入 21 世纪以来, 流域各源流普遍进入丰水期, 阿克苏河、和田河和叶尔羌河近 10 a 平均来水量比多年平均来水量增加了 27.45 亿 m^3 , 对于干流下游生态输水影响较大的开都河近 10 年的水量也比多年平均高出 0.74 亿 m^3 。然而, 由于源流区灌溉面积增加了一倍多, 年用水量平均约增加 50 亿 m^3 , 导致补给干流的总水量并未有明显变化^[5-6]。因此, 在现有的水土资源扩张开发模式下, 降水与源流来水的增多对干流来水增加的影响并不大。

从 20 世纪 50 年代开始, 在源流阿克苏河、和田河、叶尔羌河, 甚至在塔里木河干流, 开发了大规模的灌溉农业。过度的水土资源开发利用, 特别是 1972 年下游大西海子拦河水库建成以后, 直接导致河道断流。为了保护流域的生态环境, 拯救断流近 30 a 濒于毁灭的下游“绿色走廊”, 中国政府投资 107 亿元, 于 2001 年启动了塔里木河流域近期综合治理工程。如今, 流域生态环境得到初步改善, 近期综合治理虽取得了明显成效, 但这与近

10 a 和田河、叶尔羌河、阿克苏河和开都-孔雀河(以下简称“开-孔河”) 4 条源流天然来水持续偏丰的客观原因是密切相关的; 同时, 前期治理从 2000-2009 年实施后, 源流通过常规和高科技节水增加 11.4 亿 m^3 , 开发地下水 1.4 亿 m^3 , 合计 12.8 亿 m^3 , 但是这些水量并没有输往干流, 而是全部被开荒占用^[7], 耕地的大规模、无序、快速扩张毁坏了大面积的天然植被并挤占了大量的生态用水, 从 20 世纪 70 年代初开始, 下游 300 余 km 的河道断流近 30 a, 过度无序的水土开发、严重恶化的生态环境和由此引发的各种社会矛盾, 引起了国内外的广泛关注^[8], 厘清近年来各流域耕地面积变化情况、以水资源为主线计算并分析规划年各流域能承载的最大灌溉面积及超载情况等相关研究的开展势在必行。然而, 由于流域面积巨大, 各流域耕地耗水情况各不相同且十分复杂, 国内相关研究的开展甚少。

为此, 本文基于塔里木河流域水资源量及水资源利用水平资料, 结合《塔里木河流域工程与非工程措施五年实施方案》(2002 年)(以下简称《五年实施方案》)^[9], 通过 Mann-kendall 单调趋势检验及未来趋势变化 Hurst 指数检验分析了近 20 a 来塔里木河流域耕地面积变化特征, 计算探讨了流域现状水平年(2010 年)以及规划年(2020 年)可承载的最大灌溉面积、现状水平年灌溉面积超载情况、不同来水频率下规划年规划灌溉面积超载和生态水保证情况。其目的是为遏制流域自然生态和环境恶化趋势提供基础依据, 这对塔里木河流域以水资源量来定人工绿洲规模、优化水资源利用规划与配水制度意义重大。

1 研究区概况

塔里木河流域位于新疆南部,是环塔里木盆地的阿克苏河、渭干河、迪那河、喀什噶尔河、叶尔羌河、和田河、开都河—孔雀河、克里雅河、车尔臣河等 9 大水系共 144 条河流的总称,流域总面积 102 万 km²,多年平均径流量约 401 亿 m³。流域分为干流区和源流区,叶尔羌河和阿克苏河在肖夹克会合后始称塔里木河,干流自身不产流,从肖夹克

至台特玛湖河道全长 1 321 km,其中上游河段肖夹克至英巴扎,长 495 km;中游河段英巴扎至恰拉,长 398 km;下游河段恰拉至台特玛湖,长 428 km。受人类活动与气候变化的影响,许多源流早已中断了向干流的水量补给,目前 9 大向心聚流水系中,阿克苏河、和田河、叶尔羌河和开都河—孔雀河 4 条源流与干流有地表水力联系,本文以下简称为“四源—干”(图 1)。

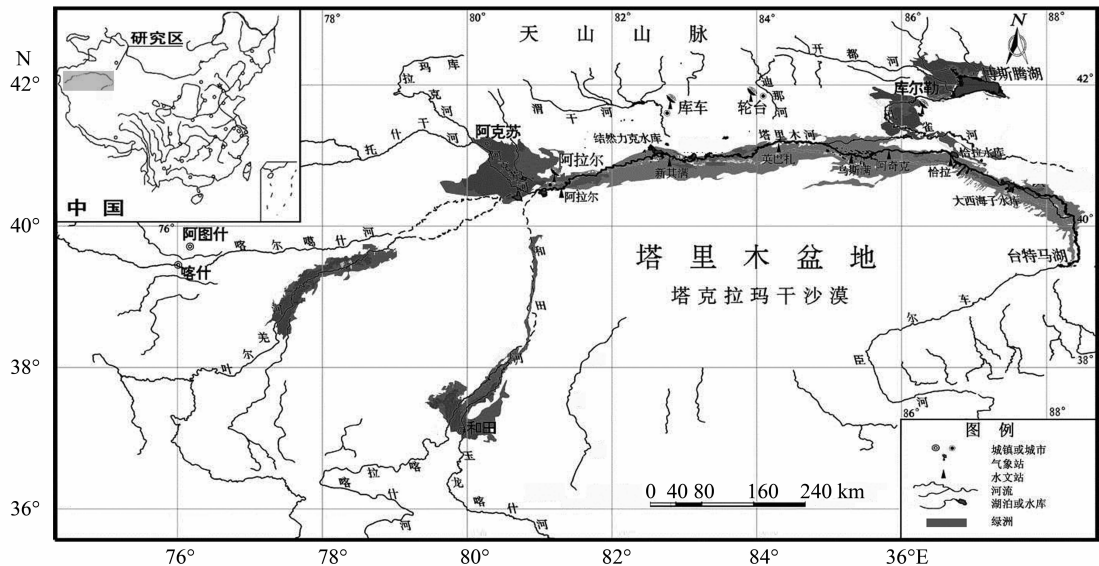


图 1 塔里木河流域水系示意图

Fig. 1 The water system of Tarim River Basin

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

塔里木河流域“四源—干”不同来水频率下的水量分配方案由《塔河流域近期综合治理规划》(2001)^[10]和《塔里木河流域“四源—干”地表水水量分配方案》(2010) (以下简称《分配方案》)^[11]获得。流域综合毛灌溉定额和 2010 及 2020 年生活、工业、牲畜规划用水量参照了《塔里木河流域综合治理规划》(2012)。塔里木河“四源—干”2010 年实际灌溉面积和 2020 年规划面积参照了《五年实施方案》。在塔里木河“四源—干”各流域行政区划范围的基础上,以 1991—2011 年《新疆统计年鉴》^[12]与《新疆生产建设兵团统计年鉴》^[13]为依据,统计出 1990—2010 年塔里木河流域“四源—干”耕地面积。

各流域生态需水量前人研究结果有差异,郭

斌^[14]分析了开—孔河流域供需水平衡,并对该流域未来水量进行模拟预测,将该流域生态需水定为 20.01 亿 m³;雷志栋等^[15]认为叶尔羌河与阿克苏河流域生态需水量分别为 23.87 亿、13.11 亿 m³;关洪涛等^[16]在对和田河绿色走廊天然生态需水量进行估算时得出和田河流域生态需水量为 7.05 亿 m³。有关部门指出“打通沿线、穿越沙漠另需水 10 亿 m³”。本文采用以上两项之和 17.05 亿 m³作为和田河流域的生态需水量;2011 年徐海量^[17]在完成《塔里木河生态需水及对策研究》研究报告时,将干流流域生态需水量定为 37.4 亿 m³。

2.2 研究方法

2.2.1 耕地面积变化趋势检验 基于秩的 Mann-Kendall 统计检验方法常用来预测时间序列资料的长期变化趋势,使用该方法进行趋势检验时,无需事先假定样本的统计分布。本文在以往研究成果^[18]的基础上通过 Mann-Kendall 单调趋势检验近

20 a 来塔里木河流域的耕地面积变化趋势；Hurst 指数是定量描述时间序列长程依赖性的有效方法^[19]，在水文学、经济学、气候学、地质和地球化学等领域有着广泛的应用，近期在 10 年以上时间序列的植被覆盖变化研究中应用起来^[20-21]。本文采用最常用的 R/S 分析法^[22]计算 Hurst 指数，以检验流域耕地未来趋势变化。其过程为：

首先，对时间序列 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ 依次比较，结果记为 $\text{sgn } \theta$ ：

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (1)$$

接着便可用如下公式计算出 Mann-Kendall 统计值：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (2)$$

式中 x_k, x_i 为要进行检验的随机变量， n 为所选数据序列的长度。

则与此相关的检验统计量为：

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

随着 n 的逐渐增加， Z_c 很快收敛于标准化正态分布，当 $-Z_{1-a/2} \leq Z_c \leq Z_{1-a/2}$ 时，接受原假设，表明样本没有明显变化趋势，其中， $\pm Z_{1-a/2}$ 是标准正态分布中值为 $1 - a/2$ 时对应的显著性水平 a 下的统计值。当统计量 Z_c 为正值，说明序列有上升趋势； Z_c 为负值，则表示有下降趋势。

在 Mann-Kendall 检验中，常用 β 表示时间序列变化率，其公式为：

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \quad \forall j < i \quad (4)$$

式中， $1 < j < i < n$ ，但 β 为正值时表示时间序列呈上升趋势，为负值时意味着下降趋势。

再在以上基础上进行基于 R/S 分析的 Hurst 指数计算，其基本步骤如下：

对于一个时间序列 $x(t), t=1, 2, \dots$ 。均值序列为：

$$Y(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t), \tau = 1, 2, \dots \quad (5)$$

累积离差为

$$F(t, \tau) = \sum_{u=1}^t x(u) - Y(\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (6)$$

极差为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} F(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} F(t, \tau) \quad (7)$$

$$\tau = 1, 2, \dots$$

标准差为

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - Y(\tau))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\tau = 1, 2, \dots$$

Mandelbrotetal 证实了 Hurst 的研究，并得出了更广泛的指数律，即

$$R/S = \left(\frac{\tau}{2}\right)^H \quad (9)$$

式中 H 为 Hurst 指数 ($0 < H < 1$)。对公式(9)两边同时取对数即得到赫斯特经验公式，基于时间序列并利用赫斯特经验公式得到的一簇 H 值进行最小二乘法拟合，得出的直线斜率即为修正后的赫斯特指数 ($0 < H < 1$)。对于不同的 H ，表示序列有不同的趋势变化：当 $H = 0.5$ 时，表明时间序列是相互独立的、方差有限的随机序列；当 $0 < H < 0.5$ 时，意味着未来的变化状况与过去相反，即反持续性， H 越小，反持续性越强；当 $H > 0.5$ 时，意味着未来的变化状况与过去一致，这个过程具有持续性。

2.2.2 最大农业水量及最大灌溉面积 根据流域水系组成及其径流特性、人工绿洲与天然绿洲分布格局以及生态环境的地域特征综合分析，流域生态调度应通过“初始水权管理、源流总量控制，丰平水期确保生态流量、枯水期保证最小灌溉面积”实现流域水资源配置方案目标，其技术路线如图 2，以此为依据得出不同来水频率下最大农业水量的计算方法：

1) 丰、平水年份，最大农业水量是用区域多年平均水资源总量扣除人类生活、牲畜及工业用水量^[10]等后的水量，还要留出满足下游天然植被保护和恢复所需的水量，即：

$$W_{\text{农业}} = W_{\text{总}} - W_{\text{生活}} - W_{\text{牲畜}} - W_{\text{工业}} - W_{\text{生态}} \quad (10)$$

2) 枯水年 (75% 来水频率) 农业最大水量的计算方法是：如果流域的水资源量在满足生活、牲畜、工业用水、给干流下泄，以及生态需水量后，留给农业灌溉的水量大于《五年实施方案》规划面积所需水量，此时流域最大农业水量的计算同丰、平水期的计算方法一样；如果流域水资源总量减去以上各用水量后，剩余的水量小于《五年实施方案》规划面积用水量时，将《五年实施方案》规划面积用水量的 90% 作为农业用水。

3) 特枯水年 (90% 来水频率) 农业最大水量的计算方法是：如果流域的水资源量在满足生活、牲畜、工业用水、给干流下泄，以及生态需水量

后, 留给农业灌溉的水量大于《五年实施方案》^[9] 规划面积所需水量, 此时流域最大农业水量的计算同丰、平水期的计算方法一样; 如果流域水资源总量减去以上各用水量后, 剩余的水量小于《五年实施方案》规划面积用水时, 将《五年实施方案》^[9] 规划面积用水量的 75% 作为农业用水。

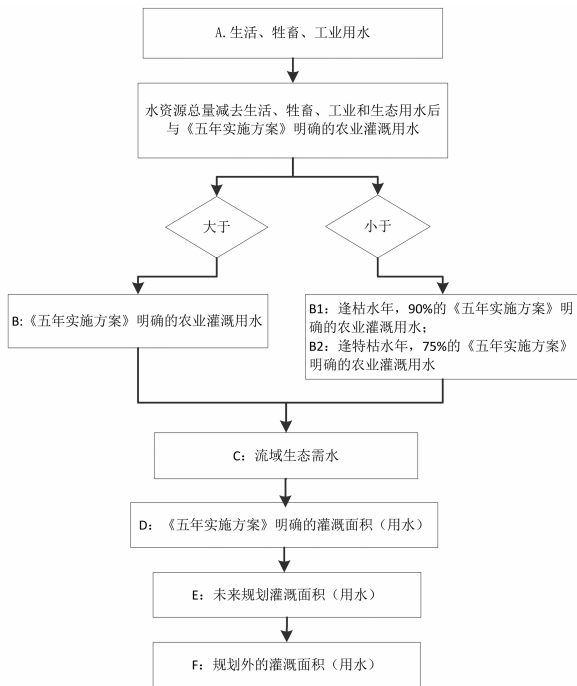


图 2 塔里木河流域水资源配置技术路线图

Fig. 2 Technical route of water resources allocation in Tarim River Basin

流域可承载的最大灌溉面积在最大农业水量的基础上通过综合毛灌溉定额计算。其计算公式为: 最大灌溉面积 = 最大农业水量 / 综合毛灌溉定额。

2.2.3 生态水保证率计算 在干旱区, 降水极少, 因此生态用水补给主要通过河流, 如果流域灌溉面积超载, 一定的超载面积必定会挤占一定的生态水量, 导致天然植被得不到补给而衰败甚至消失。为了准确反映塔里木河流域“四源一干”生态水的保证情况, 本文计算了流域生态水保证率, 计算方法为: 流域能够用到生态的水资源量除以该流域总的生态需水量^[23]。

3 结果与分析

3.1 流域耕地面积变化趋势

地域等因素造成塔里木河流域水资源分布不均, 而水资源是绿洲面积的决定性因素, 那么耕地的面积变化也会随水分条件差异呈现不同的特点。

统计资料显示, 塔里木河“四源一干”中, 叶尔羌河、阿克苏河流域是河川径流量最大的流域, 同时也是拥有耕地面积最大的两大流域。图 3 显示了近 20 a “四源一干”耕地面积变化情况。

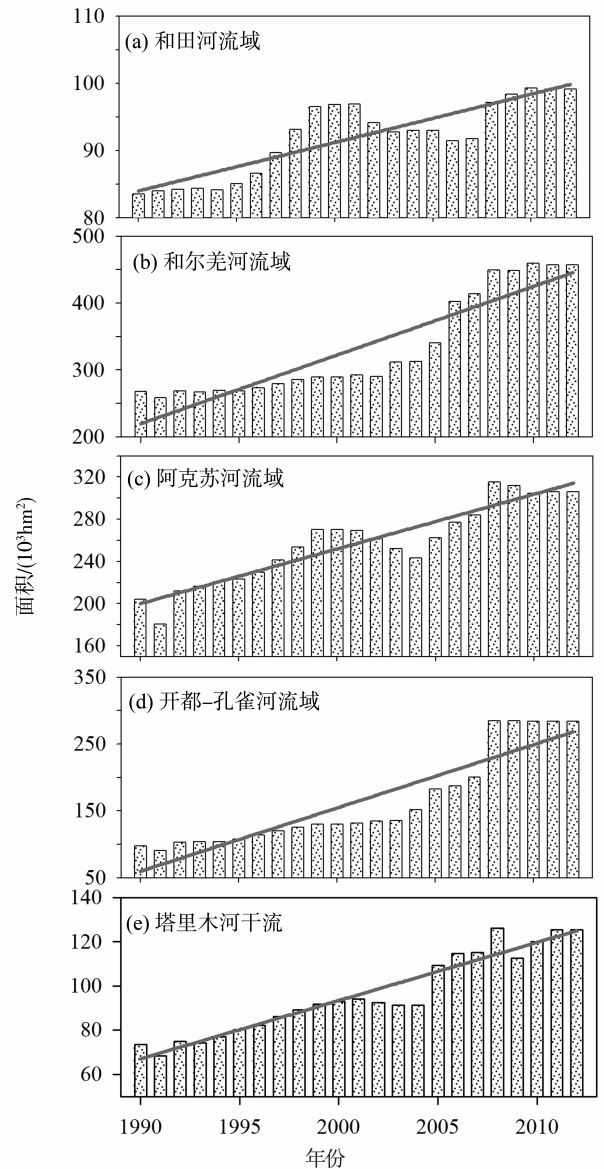


图 3 1990 - 2010 年塔里木河“四源一干”耕地面积变化

Fig. 3 The area change of cultivated land of four source streams and the mainstream of Tarim river in 1990 - 2010

经 Mann-Kendall 单调趋势检验, 近 20 a 来, 塔里木河流域“四源一干”耕地面积呈显著增加的趋势 (表 1)。其中, 增加最快的流域是叶尔羌河流域, 以平均每年 0.96 万 hm^2 的速度增加, 开-孔河和阿克苏河流域增加速度分别为每年 0.93 万 hm^2 和 0.50 万 hm^2 。对塔里木河流域耕地面积

计算时间序列的 Hurst 指数。结果显示，塔里木河“四源一干”各流域耕地面积在未来一段时间将呈

持续增加的态势。按目前的趋势发展下去，2020 年塔里木河流域耕地面积将远远超出流域承载力。

表 1 塔里木河流域“四源一干”耕地面积变化 Mann-Kendall 趋势检验及未来趋势检验¹⁾

Table1 The Mann-Kendall trend test and future trend test of area changes of cultivated land of four source streams and the mainstream of Tarim river basin

流域	Zc	Sig	β	趋势	H ₀	Hurst 指数
开-孔河流域	6.21	**	7.098	显著增加	R	0.911 4
阿克苏河流域	5.20	**	4.999	显著增加	R	0.925 6
叶尔羌河流域	6.21	**	9.418	显著增加	R	0.943 6
和田河流域	4.41	**	0.738	显著增加	R	0.957 4
塔里木河干流	5.68	**	2.683	显著增加	R	0.947 3

1) Sig. 为显著性，** 表示极显著；R 表示接受原假设

3.2 现状水平年最大灌溉面积及超载情况

在现状水平年，流域处于平水期，最大农业水量按照丰、平水期最大农业水量计算方法计算。通过计算，塔里木河流域“四源一干”在可承载能力水平下各流域最大的灌溉面积如表 2 所示。

比较“四源一干”2010 年实际灌溉面积与其可承载的最大灌溉面积（表 3），2010 年塔里木河流域“四源一干”中除和田河流域外，其余流域灌溉面积均处于超载水平。其中开-孔河灌溉面积超载最为严重，超载百分比为 85.3%。

表 2 塔里木河“四源一干”2010 年可承载的最大灌溉面积

Table 2 The maximum irrigation area of four source streams and the mainstream of Tarim river basin in 2010

水系	可利用水资源量		需水量/亿 m ³				给干流下泄水量/(亿 m ³)	农业用水量/(亿 m ³)	毛灌溉定额 (m ³ · hm ⁻²)	最大灌溉面积 (万 hm ²)
	(亿 m ³)	生活	工业	牲畜	生态					
和田河	50.66	0.60	0.09	0.17	17.05	9.29	23.47	10 700	21.93	
叶尔羌河	73.24	1.34	0.17	0.45	23.87	3.30	44.11	10 640	41.46	
阿克苏河	95.90	0.70	0.80	0.18	13.11	34.20	46.91	11 689	40.13	
开-孔河	42.93	0.85	1.17	0.15	20.01	2.50	18.25	9 381	19.45	
干流	47.34	0.08	0.01	0.03	37.40	0	9.83	16 149	6.08	
四源一干	310.07	3.56	2.23	0.98	111.44	49.29	142.57	-	129.06	

表 3 塔里木河“四源一干”2010 年耕地超载情况

Table 3 Cultivated land overload situations of four source streams and the mainstream of Tarim river basin in 2010

水系	最大灌溉面积/(万 hm ²)	实际灌溉面积/(万 hm ²)	超载面积/(万 hm ²)	超载百分比/%
和田河	21.93	20.30	不超	-
叶尔羌河	41.46	50.23	8.77	21.10
阿克苏河	40.13	54.17	14.04	35.00
开-孔河	19.45	36.05	16.59	85.30
干流	6.08	10.02	3.93	64.60
四源一干	129.06	170.76	43.33	33.60

近 20 a (1990 - 2010 年) 塔里木河“四源一干”耕地面积不断增加，按这一趋势发展下去，规划年(2020 年)塔里木河流域耕地面积将远远超出流域承载力，这无疑会导致生产用水抢占生态用水，上游用水抢占下游用水破坏下游水过程的完

整性被，使得绿洲退化，对社会经济和生态环境保护可持续协调发展产生严重不利影响^[24-26]。水资源是塔里木河流域农业发展和生态环境建设最主要的制约因素，有关部门必须从战略高度来认识塔里木河流域现阶段水资源短缺问题与耕地面积不合理

扩张之间存在的矛盾, 严格控制灌溉面积增长, 建立高效节水农业体系, 发展高效生态农业, 以扭转塔里木河流域灌溉面积持续超载的严重危机^[27]。

3.3 规划年最大灌溉面积、超载及生态水保证情况

基于国家《水文基本术语和符号标准》(GB/T50095-98)^[28]中河川径流丰枯年型划分方法, 根据塔里木河多年来水量的皮尔逊Ⅲ型频率分布曲线, 当某年来水频率小于 25% 时, 则河流处于特丰水年; 当来水频率介于 25% ~ 50% 时, 河流处于偏丰水年; 当来水频率介于 50% ~ 75% 时, 河流处于平水年; 当来水频率大于 75% 时, 则河流水系进入枯水年; 当某年来水频率介于 75% ~ 90% 时, 定义河流水系处于偏枯水年; 当来水频率大于 90% 时, 则河流水系进入特枯水年。本文分别计算了各流域四种来水频率下规划年的最大灌溉面积、超载及生态水保证情况。

3.3.1 25% 来水频率 当来水频率为 25% 时, 流域处于是丰水期, 最大农业水量按照丰、平水期最大农业水量计算方法计算。通过计算, 2020 年塔里木河流域“四源一干”除开-孔河流域规划灌

溉面积超出最大灌溉面积 14.6% 外, 其它流域均不超载 (表 4)。

3.3.2 50% 来水频率 当来水频率为 50% 时, 流域处于平水期, 最大灌溉面积的计算与丰水期一致。通过计算, 2020 年塔里木河流域“四源一干”除和田河流域不超载外, 其他流域均超载, 超载主要发生在开-孔河和塔里木河干流, 分别超出其最大灌溉面积的 31.6% 和 34.1% (表 5)。

3.3.3 75% 来水频率 当来水频率为 75% 时, 属于枯水年份, 在计算 2020 年塔里木河“四源一干”能承载的最大灌溉面积时, 由于和田河与阿克苏河流域这两个流域的水资源量在满足生活、牲畜、工业用水、给干流下泄, 以及生态需水量后, 留给农业灌溉的水量大于《五年实施方案》规划面积所需水量, 此时这两个流域最大农业水量的计算同丰、平水期的计算方法一样, 得出和田河与阿克苏河流域最大农业用水分别为 18.6 亿、42.7 亿 m^3 。在计算开-孔河、叶尔羌河与塔里木河干流最大灌溉水量时, 由于这 3 个流域水资源总量减去

表 4 塔里木河“四源一干”2020 年 25% 来水频率时最大灌溉面积及规划灌溉面积超载情况

Table 4 The maximum irrigation area and planning irrigation area overload situations of four source streams and the mainstream of Tarim river basin in 25% runoff frequency in 2020

水系	可利用 水资源量 (亿 m^3)	需水量/(亿 m^3)				给干流 下泄水量 (亿 m^3)	农业用水 (亿 m^3)	毛灌溉 定额 ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	最大灌溉 面积	规划灌溉 面积 (万 hm^2)	超载 面积
		生活	工业	牲畜	生态						
和田河	59.16	0.90	0.32	0.22	17.05	15.51	25.17	9 373.50	26.85	21.13	不超
叶尔羌河	83.79	1.75	0.73	0.41	23.87	5.58	51.46	8 962.50	57.41	53.33	不超
阿克苏河	108.40	1.07	1.79	0.23	13.11	42.03	50.17	9 588.75	52.32	47.81	不超
开-孔河	47.08	1.34	3.98	0.17	20.01	4.50	17.09	8 295.00	20.60	23.69	46.43
干流	53.01	0.10	0.03	0.04	37.40	0	15.45	14 544.75	10.62	9.02	不超
四源一干	351.44	5.15	6.85	1.06	111.40	67.62	159.33	-	167.80	154.99	不超

表 5 塔里木河“四源一干”2020 年 50% 来水频率时最大灌溉面积及规划灌溉面积超载情况

Table 5 The maximum irrigation area and planning irrigation area overload situations of four source streams and the mainstream of Tarim river basin in 50% runoff frequency in 2020

水系	可利用 水资源量 (亿 m^3)	需水量/(亿 m^3)				给干流 下泄水量 (亿 m^3)	农业用水 (亿 m^3)	毛灌溉 定额 ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	最大灌溉 面积	规划灌溉 面积 (万 hm^2)	超载 面积
		生活	工业	牲畜	生态						
和田河	50.66	0.90	0.32	0.22	17.05	9.29	22.89	9 374	24.42	21.13	不超
叶尔羌河	73.24	1.75	0.73	0.41	23.87	3.30	43.19	8963	48.19	53.33	5.15
阿克苏河	95.90	1.07	1.79	0.23	13.11	34.20	45.50	9 589	47.45	47.81	0.37
开-孔河	42.93	1.34	3.98	0.17	20.01	2.50	14.94	8 295	18.01	23.69	5.69
干流	47.34	0.10	0.03	0.04	37.40	0	9.78	14 545	6.72	9.02	2.29
四源一干	310.07	5.15	6.85	1.06	111.40	49.29	136.29	-	144.78	154.99	13.49

生活、工业、牲畜用水、给干流下泄水量，以及生态需水量后，留给农业灌溉的水量小于《五年实施方案》规划面积用水，依据枯水期调水原则，这三个流域 75% 来水频率下的最大农业水量为《五年实施方案》规划面积用水量的 90%，得出开-孔河、叶尔羌河与干流的最大灌溉水量分别为

14.64 亿、35.03 亿、8.47 亿 m^3 （表 6）。

在 75% 来水频率下，2020 年塔里木河“四源一干”规划灌溉面积与最大灌溉面积相比均超载，超载主要发生在塔里木河干流、叶尔羌河和开-孔河，分别超出其最大灌溉面积的 54.8%、36.4% 和 34.2%。

表 6 2020 年 75% 来水频率时塔里木河“四源一干”最大灌溉面积、规划灌溉面积超载及生态水保证情况

Table 6 The maximum irrigation area, planning irrigation area overload situations and ecological water guarantee situations of four source streams and the mainstream of Tarim river basin in 75% runoff frequency in 2020

水系	最大灌溉水量	最大灌溉面积	2020 年规划面积	超载面积	超载	挤占生态水量	生态需水量	生态水
	(亿 m^3)	(万 hm^2)	(万 hm^2)	(万 hm^2)	百分比/%	(亿 m^3)	(亿 m^3)	保证率/%
和田河	18.60	19.84	21.13	1.29	6.5	1.21	17.05	92.9
叶尔羌河	35.03	39.09	53.33	14.25	36.4	12.77	23.87	46.5
阿克苏河	42.70	44.53	47.81	3.28	7.4	3.15	13.11	76.0
开-孔河	14.64	17.66	23.69	6.04	34.2	5.01	20.01	75.0
干流	8.47	5.82	9.02	3.19	54.8	4.64	37.40	87.6
四源一干	119.45	126.94	154.99	28.05	22.1	26.78	111.44	76.0

在 75% 来水频率下，生态可能受影响，因为耕地超载引起生态水挤占现象，造成生态水亏缺。和田河流域超载面积最少，能保证生态水的 92.9%，叶尔羌河流域超载面积最多，仅能保证生态水的 46.5%。经合计，2020 年在 75% 来水频率下塔里木河流域“四源一干”26.78 亿 m^3 的生态水将被挤占。

3.3.4 90% 来水频率 当来水频率为 90% 时，属于枯水年份，在计算 2020 年塔里木河“四源一干”能承载的最大灌溉面积时，由于和田河与阿克苏河流域的水资源量在满足生活、工业、牲畜用水、给干流下泄水量，以及生态需水量后，留给农业灌溉的水量大于《五年实施方案》规划面积用水（表 12），在计算这两个流域 90% 来水频率下最大农业水量时，同丰、平水期的计算方法一样，

得出和田河与阿克苏河流域最大农业用水量分别为 17.4 亿 m^3 、35.77 亿 m^3 。在计算开-孔河、叶尔羌河与干流最大灌溉水量时，由于这 3 个流域水资源总量在扣除生活、牲畜、工业用水、给干流下泄水量，以及生态需水量后，留给农业灌溉的水量小于《五年实施方案》规划面积用水量，据枯水期调水原则，这 3 个流域 90% 来水频率下的最大灌溉水量为《五年实施方案》规划面积用水量的 75%，得出开-孔河、叶尔羌河与干流的最大灌溉水量分别为 12.2 亿 m^3 ，29.19 亿 m^3 ，7.06 亿 m^3 （表 7）。

在 90% 来水频率下，2020 年塔里木河流域“四源一干”灌溉面积与规划面积相比均超载，干流超载最为严重，超载比例为 85.8%，开-孔河和叶尔羌河超载较为严重，超载百分比分别为 61.0% 和 63.7%。

表 7 塔里木河“四源一干”2020 年 90% 来水频率时最大灌溉面积、规划灌溉面积超载及生态水保证情况

Table 7 The maximum irrigation area, planning irrigation area overload situations and ecological water guarantee situations of four source streams and the mainstream of Tarim river basin in 90% runoff frequency in 2020

水系	最大灌溉水量	最大灌溉面积	2020 年规划面积	超载面积	超载	挤占生态水量	生态需水量	生态水
	(亿 m^3)	(万 hm^2)	(万 hm^2)	(万 hm^2)	百分比/%	(亿 m^3)	(亿 m^3)	保证率/%
和田河	17.40	18.56	21.13	2.57	13.8	2.40	17.05	85.9
叶尔羌河	29.19	32.57	53.33	20.76	63.7	18.60	23.87	22.1
阿克苏河	35.77	37.31	47.81	10.51	28.2	10.10	13.11	23.2
开-孔河	12.20	14.71	23.69	8.98	61.0	7.40	20.01	62.8
干流	7.06	4.85	9.02	4.16	85.8	6.10	37.40	83.8
四源一干	101.63	108.01	154.99	46.98	43.5	44.59	111.44	60.0

在 90% 来水频率下,和田河流域超载面积最少,能保证生态水的 85.9%,叶尔羌河流域超载面积多,仅能保证生态水的 22.1%。经合计,2020 年在 90% 来水频率下塔里木河流域“四源一干”44.59 亿 m^3 的生态水将被挤占。

综上所述,在规划年,当来水频率为 25% 时,塔里木河流域“四源一干”中除开-孔河流域规划面积超出了最大灌溉面积的 15.0% 外,其它均不超载,在 50%、75% 和 90% 来水频率下,规划灌溉面积分别超载 13.49 万 hm^2 ,28.05 万 hm^2 和 46.98 万 hm^2 。这表明丰水期流域水量基本可以满足农业灌溉,规划灌溉面积在合理范围之内,但是相等规划灌溉面积在枯(特枯)水期会出现超载现象,所以规划灌溉面积的制定还要参照其他来水频率下流域所能承载的最大灌溉面积;规划灌溉面积的严重超载势必会导致流域内耕地的大规模、快速扩张,使得大面积的天然植被被毁坏,不利于流域水土资源合理配置,管理部分应该充分认识到现阶段规划灌溉面积制定中存在的问题,在遵守自然规律的基础上提出更加科学、准确的流域规划方案,进而指导流域良性发展^[29]。在 75% 和 90% 来水频率下,即枯水期,流域生态水保证率过低,表明在规划年枯水期生态水的供应有一定压力,而持续枯水期引发输往下游水量减少,势必会导致下游天然植被得不到灌溉而死亡^[30],所以要在规划灌溉面积的制定过程中参照枯(特枯)水期流域所能承载的最大灌溉面积,同时对现阶段枯(特枯)水期生态水供应就已经困难的区域进行强行退地,以遏制流域生态环境持续恶化。

4 结 论

通过以上分析与研究,可以得出以下几点结论:

1) 近 20 a(1990 - 2010 年)塔里木河“四源一干”耕地面积呈显著增加的趋势:耕地面积增加最快的流域是叶尔羌河流域,以平均每年 0.96 万 hm^2 的速度增加,开-孔河和阿克苏河流域增加速度分别为每年 0.93 万 hm^2 和 0.50 万 hm^2 。

2) 现状水平年塔里木河“四源一干”能承载的最大灌溉面积为 129.06 万 hm^2 ,除了和田河流域灌溉面积不超载外,其它流域均超载,总计超载面积为 43.33 万 hm^2 ,其中叶尔羌河、阿克苏河、开-孔河、干流流域分别超载 8.77、14.04、16.59、3.93 万 hm^2 ,超载比例分别为 21.1%、35.0%、85.3%、64.6%。

3) 规划年在 25% 来水频率下,塔里木河流域“四源一干”能承载的最大的灌溉面积是 167.80 万

hm^2 ,除了开-孔河流域规划面积超出了最大灌溉面积的 15.0% 外,其它均不超载。在 50% 来水频率下,可承载的最大灌溉面积为 144.78 万 hm^2 ,开-孔河、干流、叶尔羌河流域规划灌溉面积分别超出其最大灌溉面积的 31.6%、34.1%、10.7%;在 75% 来水频率下,可承载的最大灌溉面积为 126.94 万 hm^2 ,开-孔河、干流、叶尔羌河流域规划灌溉面积分别超出最大灌溉面积的 34.2%、54.8%、36.4%,阿克苏河与和田河流域超载比例较小,分别超出最大灌溉面积的 7.4%、6.5%;在 90% 来水频率下,可承载的最大灌溉面积为 108.01 万 hm^2 ,开-孔河、干流、叶尔羌河、阿克苏河、和田河流域灌溉面积分别超出最大灌溉面积 61.0%、85.8%、63.7%、28.2%、13.8%。

4) 随来水量的减少,生态水被挤占现象更加严重,在 25%、50%、75%、90% 四种来水频率下,2020 年生态水分别可保证 95.7%、81.2%、61.4%、44.2%。

参考文献:

- [1] CHEN Y N, LI W H, XU C C, et al. Effects of climate change on water resources in Tarim River Basin, Northwest China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(4):488 - 493.
- [2] CHEN Y N, XU Z X. Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2005, 48(1):127 - 133.
- [3] HARTMANN H, SNOW J A, STEIN S, et al. Predictors of precipitation for improved water resources management in the Tarim River basin [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 125:31 - 42.
- [4] 李红军,姜志红,魏文寿. 近 40 年来塔里木河流域旱涝的气候变化 [J]. *地球科学*, 2007, 27(6):1216 - 1222.
LI H J, JIANG Z H, WEI W T. Drought and flood change of tarim river basin in recent 40 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6):1216 - 1222.
- [5] XU J H, CHEN Y N, LI W H, et al. The complex non-linear systems with fractal as well as chaotic dynamics of annual runoff processes in the three headwaters of the Tarim River [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(1):1227 - 1239.
- [6] CUI Z, CHEN Y, ZHAO R. Responses of surface runoff to climate change and human activities in the arid region of central asia: a case study in the Tarim River Basin, China [J]. *Environmental Management*, 2013, 51(4):

- 327 - 335.
- [7] 邓铭江. 中国塔里木河治水理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2009.
DENG M J. Chinese Tarim river flood control theory and practice [M]. Beijing: Science Press,2009.
- [8] 饶瑞符. 塔里木河的变迁与整治[C]//毛德华. 塔里木河流域水资源、环境与管理. 北京:中国环境科学出版社,1998:184 - 193.
RAO R F. Changes and regulation of the Tarim River [C]//MAO D H. Water resources, environment and management in Tarim River Basin. Beijing: China Environmental Science Press,1998:184 - 193.
- [9] 新疆塔里木河流域管理局. 塔里木河流域工程与非工程措施五年实施方案[R]. 2002.
Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau. Five year implementation plan of engineering and non engineering measures in Tarim River Basin [R]. 2002.
- [10] 新疆塔里木河流域管理局. 塔河流域近期综合治理规划[R]. 2001.
Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau. Comprehensive harnessing plan of Tarim River Basin in the near future [R]. 2001.
- [11] 新疆塔里木河流域管理局. 塔里木河流域“四源一干”地表水水量分配方案[R]. 2010.
Xinjiang Tarim River Basin Management Bureau. Surface water allocation scheme of the four source streams and the main stream of the The Tarim River Basin [R]. 2010.
- [12] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2013.
Statistics bureau of xinjiang uygur autonomous region. Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press,2013.
- [13] 新疆生产建设兵团统计局,国家统计局兵团调查总队. 新疆生产建设兵团统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2013.
Statistics bureau of xinjiang production and construction corps, National bureau of statistics corps investigation corps. Statistical yearbook of Xinjiang production and construction corps [M]. Beijing:China Statistics Press, 2013.
- [14] 郭斌. 开都 - 孔雀河流域供需水平衡与模拟预测[D]. 乌鲁木齐:中国科学院新疆生态与地理研究所, 2013.
GUO B. Water balance and simulation prediction of supply and demand in Kaidu-Kongque River Basin [D]. Urumqi: Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences,2013.
- [15] 雷志栋,胡和平,杨诗秀,等. 塔里木盆地绿洲耗水分析[J]. 水利学报,2006,37(12):1470 - 1475.
LEI Z D, HU H P, YANG S X, et al. Analysis on water consumption in oases of the Tarim Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(12):1470 - 1475.
- [16] 关洪涛,杨慧慧,宋建鹏,等. 和田河绿色走廊天然生态需水量估算[J]. 水资源与水工程学报,2005,16(1):71 - 75.
GUAN H T, YANG Z H, SONG J P, et al. Estimation of the requiring water quantity for maintaining the natural vegetation in Hetianhe river green corridor [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16 (1):71 - 75.
- [17] 徐海量,白元,凌红波,等. 塔里木河生态需水及对策研究[M]. 乌鲁木齐:新疆科学出版社,2011.
XU H L, BAI Y, LING H B, et al. Study on ecological water demand of Tarim River and Its Countermeasures [M]. Urumqi: Xinjiang Science Press,2011.
- [18] HAMED K H, RAO A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1):182 - 196.
- [19] 侯西勇,应兰兰,高猛,等. 1998 - 2008年中国东部沿海植被覆盖变化研究[J]. 地理科学, 2010,30(5):735 - 741.
HOU X Y, YING L L, GAO J, et al. Study on vegetation cover change in eastern coastal areas of China during 1998 - 2008 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010,30(5):735 - 741.
- [20] 袁丽华,蒋纬国,申文明,等. 2000 - 2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报,2013,33(24):7798 - 7806.
YUAN L H, JIANG W G, SHEN W M, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(24):7798 - 7806.
- [21] 范娜,谢高地,张昌顺,等. 2001年至2010年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析[J]. 资源科学,2012,34(7):1222 - 1231.
FAN N, XIE G D, ZHANG C S, et al. Spatial-temporal dynamic changes of vegetation cover in Lancang River Basin during 2001 - 2010 [J]. Resources Science, 2012,34(7):1222 - 1231.
- [22] 王桂刚,周克法,孙莉,等. 近10a新疆地区植被动态与R/S分析[J]. 遥感技术与应用,2010,25(1):84 - 90.
WANG G G, ZHOU K F, SUN L, et al. Vegetation dynamics and R/S analysis of 10 a in Xinjiang area [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25 (1):84 - 90.
- [23] 叶茂. 塔里木河流域环境承载力研究[D]. 乌鲁木

- 齐:新疆师范大学,2014.
- YE M. Study on environmental carrying capacity of Tarim River Basin [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2014.
- [24] 满苏尔·沙比提, 努尔卡木里·玉素甫. 塔里木河流域绿洲耕地变化及其河流水文效应[J]. 地理研究, 2010, 29(12): 2251 - 2260.
- MANSUR S, NURKAMIL Y. Oasis land use change and its hydrological response to Tarim River Basin [J]. Geographical Research, 2010, 29(12): 2251 - 2260.
- [25] JOSEPH S. Sustainable irrigation Agriculture in the Tarim River Basin of Western Xinjiang Province-A proposal for the establishment of a salinity laboratory of P. R. China [J]. Arid Land Geography, 2000, 23(2): 174 - 176.
- [26] 徐海量, 叶茂, 宋郁东, 等. 塔里木河流域水文过程的特点初探[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 156 - 170.
- XU H L, YE M, SONG Y D, et al. Characteristic analysis on hydrological processes of Tarim River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 156 - 170.
- [27] 孟丽红, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 185 - 190.
- MENG L H, CHEN Y N, LI W H. Study of water resources carrying capacity in Tarim River Basin of Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 185 - 190.
- [28] 中华人民共和国水利部. 水文基本术语和符号标准 (GB/T50095-98) [M]. 1999.
- Ministry of Water Resources of the PRC. Standard for essential technical terms and symbols in hydrology (GB/T50095-98) [M]. 1999.
- [29] 高前兆, 樊自立. 塔里木流域的环境治理与水土保持生态建设[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 11 - 15.
- GAO Q Z, FAN Z L. Environment rehabilitation and ecological construction of soil and water conservation in Tarim River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 11 - 15.
- [30] 储国强, 刘嘉麒, 孙青, 等. 新疆克里雅河洪泛事件与树轮记录的初步研究[J]. 第四纪研究, 2002, 37(6): 107 - 111.
- CHU G Q, LIU J Q, SUN Q, et al. Preliminary research on the flood events based on the studies of tree ring width (*Populus Euphratica*) in the Keriya river, Xinjiang [J]. Quaternary Sciences, 2002, 37(6): 107 - 111.