

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0131

陈东, 杨广, 李发东, 等. 节水条件下玛纳斯河流域绿洲变化及适宜规模分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 108-114.  
CHEN D, YANG G, LI F D, et al. Change and suitable scale of oasis under water saving condition in Manas River Basin[J].  
South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 108-114. (in Chinese)

# 节水条件下玛纳斯河流域绿洲变化及适宜规模分析

陈东<sup>1,2</sup>, 杨广<sup>1,2</sup>, 李发东<sup>3,4</sup>, 李鹏飞<sup>1,2</sup>, 闫珂<sup>1,2</sup>, 王泽林<sup>1,2</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆石河子 832000;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100190)

**摘要:** 干旱区节水灌溉技术的大面积推广, 有效的推动了绿洲化进程, 使绿洲规模不断扩大。针对节水条件下流域尺度绿洲适度规模问题, 以膜下滴灌技术的发源地玛纳斯河流域为例, 利用 1976-2015 年五期卫星遥感影像, 分析了节水条件下流域绿洲面积变化过程, 基于水热平衡理论构建了绿洲适宜规模计算模型, 确定了节水条件下流域绿洲适宜发展规模。结果表明: 1976-2015 年玛纳斯河流域绿洲总面积扩张 388.3 km<sup>2</sup>, 人工绿洲面积扩张 3 873.3 km<sup>2</sup>, 天然绿洲面积缩减 3 485.0 km<sup>2</sup>; 计算得出玛纳斯河流域绿洲适宜规模为 4 025.9~4 499.8 km<sup>2</sup>, 目前绿洲实际规模超出绿洲适宜规模的 3.4 倍, 且绿洲稳定指数  $H_0$  为 0.46, 表明绿洲处于亚稳定状态; 为了进一步保证绿洲稳定性, 玛纳斯河流域适宜耕地面积应为 1 801.6~2 013.7 km<sup>2</sup>。研究结果说明, 不合理的绿洲开发, 威胁到整个绿洲的稳定, 确定绿洲适宜规模, 可以为绿洲的稳定和可持续发展提供基础科学依据。

**关键词:** 绿洲适宜规模; 水热平衡; 绿洲稳定性; 玛纳斯河流域

**中图分类号:** S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0108-07

## Change and suitable scale of oasis under water saving condition in Manas River Basin

CHEN Dong<sup>1,2</sup>, YANG Guang<sup>1,2</sup>, LI Fandong<sup>3,4</sup>, LI Pengfei<sup>1,2</sup>, YAN Ke<sup>1,2</sup>, WANG Zelin<sup>1,2</sup>

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation, Shihezi 832000, China; 3. Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The large scale promotion of water saving irrigation technology in arid areas has effectively promoted the oasisization process and expanded the scale of oasis. Regarding the appropriate scale of oasis on watershed scale under water saving condition, we conducted a case study on the Manas River Basin, where the drip irrigation technology originates. We used the five period satellite remote sensing images from 1976 to 2015 to analyze the change process of oasis area under water saving condition. Based on the theory of water heat balance, we constructed a calculation model for the suitable scale of oasis, and determined the suitable development scale of the basin oasis under water saving condition. The results showed that: From 1976 to 2015, the total area of the oasis in the Manas River Basin expanded by 388.3 km<sup>2</sup>; the area of the artificial oasis expanded by 3 873.3 km<sup>2</sup>; and the area of the natural oasis diminished by 3 485.0 km<sup>2</sup>. Calculation suggested that the suitable scale of the oasis in the Manas River Basin is 4 025.9~4 499.8 km<sup>2</sup>. The actual scale of the oasis exceeds the appropriate scale of the oasis by 3.4 times. The oasis stability index  $H_0$  is 0.46, indicating the oasis is in a metastable state. In order to ensure the stability of the oasis, the suitable cultivated area of the Manas River Basin should be 1 801.6~2 013.7 km<sup>2</sup>. The research results suggested that unreason

收稿日期: 2018-05-22 修回日期: 2018-09-15 网络出版时间: 2018-09-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180925.0855.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41601579); 国家重点研发计划专项(2017YFC0404303); 新疆生产建设兵团高等学校优秀青年教师培养计划项目(CZ027204)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41601579); National Key R & D Program of China (2017YFC0404303); Training Plan for Outstanding Young Teachers in Colleges & Universities of Corps (CZ027204)

作者简介: 陈东(1990), 男, 河南信阳人, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: 525824987@qq.com

通讯作者: 杨广(1983), 男, 河北新乐人, 副教授, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: mikeyork@163.com

able development of oasis can threaten the safety and stability of the oasis. Determining the suitable scale of oasis can provide a basic scientific basis for the stability and sustainable development of oasis.

**Key words:** suitable oasis scale; water heat balance; oasis stability; Manas River Basin

绿洲是人与自然相结合的产物,是干旱、半干旱地区发展建设的基础<sup>[1,2]</sup>。近年来,国内外学者针对绿洲问题开展了大量的研究工作,主要集中在土地利用变化及驱动机理<sup>[3,4]</sup>、风险分析<sup>[5]</sup>以及土壤生物多样性<sup>[6]</sup>等方面。国内学者针对绿洲景观格局演化<sup>[7]</sup>、绿洲荒漠转化机理<sup>[8]</sup>以及土地利用/覆被变化<sup>[9]</sup>等问题开展了大量的研究工作。随着人类活动和经济发展带来的绿洲环境压力和绿洲稳定性问题,绿洲适宜规模研究逐步成为研究的热点。胡顺军<sup>[10]</sup>等通过水热、水土平衡,构建了渭干河平原绿洲适宜规模模型,并确定了适宜绿洲规模和耕地面积。凌红波<sup>[11]</sup>等利用Z指数法和水热平衡模型,对克里雅河流域不同丰枯水平下的绿洲适宜规模进行确定。黄领梅<sup>[12]</sup>等在对新疆和田绿洲适宜规模进行计算时发现,现状条件下和田绿洲规模超出适宜规模,应进行节水调控。陈亚宁<sup>[13]</sup>在对塔里木河流域绿洲研究时发现,塔里木河流域绿洲规模已达到上限,耕地规模不应再扩大。

玛纳斯河流域是我国西北地区典型的农业灌溉绿洲,是我国膜下滴灌节水技术的发源地<sup>[14,15]</sup>。近年来,随着节水技术的大面积推广,流域绿洲化进程发展迅速,高效节水灌溉面积达94.8%,在节水技术的推动下流域人工绿洲面积增加1.3倍,耕地面积年均增长速率较节水前增加了1.47倍。国内众多学者近年对玛纳斯河流域绿洲径流和气候变化<sup>[16]</sup>、地表水、地下水及地表水-地下水转换机理<sup>[17,18]</sup>、景观格局变化及生态效应<sup>[19]</sup>、土地利用/覆被变化与植被碳储量变化<sup>[20]</sup>、水盐运移及调控<sup>[21]</sup>、景观格局演变与驱动机制<sup>[22]</sup>等方面进行了大量研究。

在此基础上,本文以节水技术这一重要的人类活动为背景,针对节水技术条件下的绿洲适度规模问题,结合遥感影像分析了节水条件下玛纳斯河流域绿洲规模变化过程,以水热平衡理论为基础构建了绿洲适宜规模计算模型,计算确定了节水条件下玛纳斯河流域绿洲适度规模,为玛纳斯河流域绿洲的稳定和可持续发展提供了基础支撑和科学依据。

## 1 研究区域和研究方法

### 1.1 研究区概况

玛纳斯河流域地处新疆天山北坡中段,准噶尔

盆地南缘,包括农八师石河子市、玛纳斯和沙湾两县及周边团场,地理坐标为 $N43^{\circ}27' - N45^{\circ}21'$ ,  $E 85^{\circ}01' - E86^{\circ}32'$ 。域内绿洲水源主要依靠分布在流域内的塔西河、玛纳斯河、宁家河、金沟河4条内陆河流,形成的径流自南向北流经山区、平原区,最后在沙漠区消耗殆尽。

流域气候干燥,为中温带大陆性干旱气候<sup>[23,24]</sup>。年均气温 $4.7 \sim 5.7^{\circ}\text{C}$ ,四季气温相差悬殊;降水时空分布差异性大,年均降水量远小于年均蒸发量,年均降水量 $115 \sim 200\text{ mm}$ ,年均蒸发量 $1500 \sim 2100\text{ mm}$ ( $\varphi = 20\text{ cm}$ 蒸发皿)<sup>[25,27]</sup>。

### 1.2 数据来源

文中所用的遥感影像源自于NASA网站(<https://www.nasa.gov/>),包括玛纳斯河流域一期的MSS影像(1976年)和四期美国陆地卫星TM/ETM影像(1990年、2000年、2010年和2015年)。首先,对选定的五期三景(条带号为144-28、144-29、144-30)遥感影像进行几何粗校正、辐射定标、几何精校正、大气校正,去除云(阴影)象元,将三景遥感影像进行波段融合、影像镶嵌完成拼接,并按照研究区矢量边界对影像进行裁剪。然后,采用eCognition8.7遥感分类软件对生成的五期遥感影像进行多尺度分割和地物信息提取,通过Google Earth的高分辨率图像进行目视解译,并结合野外样点的实地考察对解译结果进行校正,最终,统计出不同时期的各地类面积。

文中所用的气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。由于玛纳斯河流域仅有石河子国家气象观测站,因此另外选取了4个周边气象观测站进行数据近似比较,分别为克拉玛依观测站、乌苏观测站、巴音布鲁克观测站和巴仑台观测站。其他如水文数据来源于玛纳斯河流域管理处;统计数据来自于自治区和地方统计年鉴,主要包括《新疆统计年鉴》<sup>[28]</sup>、《新疆建设兵团统计年鉴》<sup>[29]</sup>以及《新疆生产建设兵团第八师水中长期供求规划报告》<sup>[30]</sup>。

### 1.3 人工绿洲与天然绿洲的分类

根据绿洲发生机制将绿洲各土地利用类型划分为人工绿洲和天然绿洲<sup>[31,32]</sup>。依据樊自立<sup>[33]</sup>、王

涛<sup>[34]</sup>等学者对人工绿洲和天然绿洲的研究及我国土地资源分类系统的二级分类系统标准,结合玛纳斯河流域土地利用实际情况对人工绿洲和天然绿洲进行划分,见表 1。

表 1 玛纳斯河流域天然绿洲与人工绿洲要素划分

Tab. 1 Classification of natural oasis and artificial oasis in Manas River Basin

绿洲类型		土地利用类型
天然绿洲	林地	落叶阔叶林
		常绿针叶林
		落叶阔叶灌木林
	草地	草甸
		草原
		稀疏草地
	水域	湖泊
		河流
		沼泽地
		乔木园地
林地	乔木绿地	
	灌木绿地	
	草本绿地	
人工绿洲	耕地	水田
		旱地
	水域	水库/坑塘
		运河/沟渠
	建工用地	居住地
		工业用地 交通用地

## 1.4 绿洲适宜规模计算模型构建

### 1.4.1 模型方程

水热平衡法是以生态系统的水热平衡原理为基础提出的,根据此种方法,国内学者王忠静<sup>[35]</sup>等提出评价绿洲水热平衡的指标  $H_0$ , 见式 1:

$$H_0 = \frac{W - W' + A \cdot r}{ET_0 \cdot A} \quad (1)$$

式中:  $W$  为流域内可开采利用水资源总量, 主要包括可利用地表水量  $W_s$  和可利用地下水量  $W_g$  (亿  $m^3$ );  $W'$  为流域内非植被耗水量, 主要包括工业用水  $W_i$ 、生活用水  $W_l$  和生态耗水  $W_e$  (亿  $m^3$ );  $A$  为绿洲面积 ( $km^2$ );  $r$  为流域年降水量 (mm);  $ET_0$  为按彭曼公式计算的参考作物蒸散量 (mm)。

本文基于水热平衡方法, 结合玛纳斯河流域实际情况, 构建得到玛纳斯河流域绿洲适宜规模计算模型, 其模型如下所示:

$$A_s = \frac{\{(W_s + W_g) - (W_i + W_l + W_e)\} \times 10^5}{H_0 \cdot (ET_0 - r) \cdot \sum_{i=1}^n K_{pi}} \quad (2)$$

$$A_c = K_c \cdot A_s \quad (3)$$

式中:  $A_s$  为流域绿洲适宜面积 ( $km^2$ );  $K_{pi}$  为流域内主要植物的综合植物系数, 本文参照小麦、玉米、棉花、油料及瓜果作物系数, 加权平均取 0.85;  $A_c$  为适宜耕地面积 ( $km^2$ );  $K_c$  为耕地利用系数, 一般不宜大于 70%。  $H_0$  为绿洲的“绿度”, 是一定水资源保证下绿洲充分给水程度, 一般取值在 0.75 ~ 1 之间, 为保证玛纳斯河流域绿洲安全, 结合绿洲的实际情况,  $H_0$  初步取 0.75。  $H_0$  的大小能够反映绿洲的稳定性,  $H_0$  越大, 绿洲稳定性越高, 反之, 稳定性越低<sup>[35]</sup>。因此, 绿洲“绿度”  $H_0$ , 可以用来分析判断绿洲是否稳定。本文结合绿洲稳定性相关研究成果<sup>[36-37]</sup>以及干旱、半干旱地区绿洲生态环境特点, 将玛纳斯河流域绿洲规模的稳定性划分为以下 4 个等级, 见表 2。

表 2 绿洲稳定性划分

Tab. 2 Classification of oasis stability

评价等级	$H_0$	绿洲生态趋势	绿洲规模评价
超稳定	> 0.75	异质性将增加	具有开发潜力
稳定	0.50~ 0.75	保持平衡	在良好的措施保障下, 可谨慎扩大
亚稳定	0.20~ 0.50	开始出现退化	不具备开发潜力
不稳定	< 0.20	退化	须缩小绿洲规模以维持绿洲稳定

### 1.4.2 模型参数确定

依据《新疆统计年鉴》<sup>[28]</sup>、《新疆生产建设兵团统计年鉴》<sup>[29]</sup>、《新疆建设兵团第八师水中长期供水规划报告》<sup>[30]</sup>等相关资料 and 不同时段流域多年平均径流量对模型中地表水和地下水可利用量进行确定, 模型中工业用水、生活用水以及生态用水等耗水量经公式计算获取, 其中部分模型参数从相应的年鉴资料和相关文献<sup>[38-39]</sup>中选取确定。计算公式见表 3。

## 2 结果与分析

### 2.1 玛纳斯河流域绿洲面积变化

#### 2.1.1 绿洲总面积变化

从整个研究时段来看, 1976- 2015 年玛纳斯河流域绿洲面积呈现“增加- 减小- 增加”的变化趋势, 但整体表现出扩张的态势, 1976 年绿洲面积为 9 210.2  $km^2$  到 2015 年绿洲面积扩张至 9 598.5  $km^2$ , 扩张 388.3  $km^2$ , 见图 1。进一步分析可以发现, 节水前 (1976- 2000 年), 绿洲总面积处于扩张

表 3 部分参数计算方法  
Tab. 3 Calculation methods for some parameters

名称	计算公式	符号意义
工业用水	$W_i = I \cdot M_G$	$W_i$ 为工业用水(亿 $m^3$ ); $I$ 为单位工业 GDP 用水量( $m^3$ /万元); $M_G$ 为工业 GDP(万元)。
生活用水	$W_h = K_h \cdot P_n$	$W_h$ 为生活用水; $K_h$ 为生活用水定额( $L$ /人·d); $P$ 为人口数量(万); $n=1, 2, 3$ , 分别为城市居民、乡镇居民和农村居民。
水面蒸发耗水	$W_w = A_w \cdot \gamma \cdot E_{20}$	$W_w$ 为水面蒸发量(亿 $m^3$ ); $A_w$ 为水域面积( $km^2$ ); $\gamma$ 为地表蒸发量的换算系数; $E_{20}$ 为直径为 20 cm 蒸发皿蒸发量(mm)。
裸地蒸发耗水	$W_0 = A_0 \cdot E_p$	$W_0$ 为裸地蒸发量(亿 $m^3$ ); $A_0$ 裸地面积( $km^2$ ); $E_p$ 为潜水蒸发量(mm)。
河道内最小生态耗水	$W_r = R \cdot \mu$	$W_r$ 为河道内最小生态需水量(亿 $m^3$ ); $R$ 为多年平均年径流量(亿 $m^3$ ); $\mu$ 为河道生态基流保证系数。

期,绿洲面积由 1976 年的 9 210.2  $km^2$  扩张至 2000 年的 9 627.8  $km^2$ , 扩张 417.6  $km^2$ 。其中 1976–1990 年绿洲面积增长缓慢, 年均增长 12.1  $km^2$ ; 1990–2000 年绿洲面积增长较快, 年均增长 21.47  $km^2$ 。节水后(2000–2015 年), 绿洲面积处于缓慢缩减期, 绿洲面积由 2000 年的 9 627.8  $km^2$  缩减至 2015 年的 9 598.5  $km^2$ , 缩减 95.1  $km^2$ 。其中 2000–2010 年绿洲面积处于缩减阶段, 绿洲面积由 2000 年的 9 627.8  $km^2$  缩减至 2010 年的 9 532.7  $km^2$ , 年均减小 8.6  $km^2$ ; 2010–2015 年绿洲面积开始缓慢增长, 在此期间, 绿洲面积年均增长 11.0  $km^2$ 。

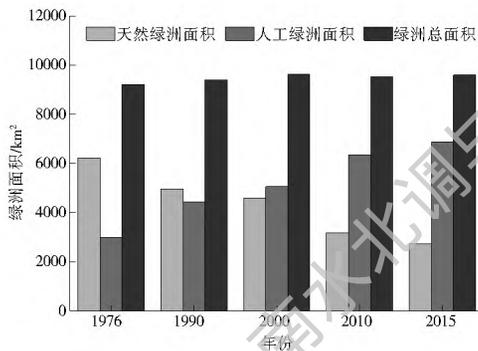


图 1 1976–2015 年玛纳斯河流域绿洲面积变化

Fig. 1 Change of oasis area from 1976 to 2015 in Manas River Basin

### 2.1.2 人工绿洲面积变化

由玛纳斯河流域人工绿洲面积变化可知(图 1), 1976–2015 年玛纳斯河流域人工绿洲面积呈明显的递增趋势。40 年间, 人工绿洲面积增长 3 873.3  $km^2$ , 年均增长 96.8  $km^2$ , 其中 1976–1990 年、1990–2000 年、2000–2010 年、2010–2015 年四个时期分别增长 1 433.3  $km^2$ 、628.7  $km^2$ 、1 304.6  $km^2$  和 506.7  $km^2$ 。高效节水技术有力地推动了人工绿洲面积的扩大。高效节水前(1976–2000 年), 人工绿洲面积由 1976 年的 2 989.5  $km^2$  增加到 2000 年的 5 051.4  $km^2$ , 年均增长 82.5  $km^2$ ; 高效节水后(2000–2015 年), 人工绿洲面积由

2000 年的 5 051.4  $km^2$  增加到 2015 年的 6 862.8  $km^2$ , 年均增长 113.2  $km^2$ 。可见, 膜下滴灌技术的大面积推广, 积极的推动了人工绿洲的扩张。

### 2.1.3 天然绿洲面积变化

由玛纳斯河流域天然绿洲面积变化可知(图 1), 1976–2015 年玛纳斯河流域天然绿洲面积呈持续递减态势, 40 年间, 天然绿洲面积缩减 3 485.00  $km^2$ , 年均缩减 87.13  $km^2$ 。其中, 1976–1990 年、1990–2000 年、2000–2010 年、2010–2015 年四个时期分别缩减 1 251.9  $km^2$ 、392.5  $km^2$ 、1 399.7  $km^2$  和 440.9  $km^2$ 。高效节水前(1976–2000 年), 天然绿洲面积由 1976 年的 6 220.7  $km^2$  减小到 2000 年的 4 576.4  $km^2$ , 年均缩减 65.8  $km^2$ ; 高效节水后(2000–2015 年), 天然绿洲面积由 2000 年的 4 576.4  $km^2$  减小到 2015 年的 2 735.7  $km^2$ , 年均缩减 115.0  $km^2$ 。结合人工绿洲面积变化可知, 高效节水技术的实施, 促进人工绿洲面积的不断扩张的同时, 挤占了天然绿洲耗水量, 加快了天然绿洲面积的退化。

## 2.2 玛纳斯河流域绿洲适宜规模的计算

### 2.2.1 绿洲可利用水资源总量及耗水量

对玛纳斯河流域绿洲可利用水资源总量和工业、生活以及生态耗水量进行计算, 见表 4。

由表 4 可以发现, 玛纳斯河流域绿洲可利用水资源总量呈现波动变化, 但波动幅度不大, 工业用水和生活用水呈现波动增加的趋势, 生态用水呈现波动减小的趋势。工业和生活用水量的增加, 挤占了生态耗水量, 造成绿洲生态环境的破坏。可见, 工业和生活用水正逐渐成为绿洲耗水的一大动力。然而, 节水技术的成熟和节水意识的增强, 使流域用水效率由 0.9 提高到 1.14<sup>[40]</sup>, 农业高效节水技术在一定程度上为流域充足用水提供了保障, 缓解了绿洲水资源紧张的局面。

表 4 玛纳斯河流域可利用水资源量及耗水量

Tab. 4 Available water resources and water consumption in Manas River Basin

年份	工业用水 / 亿 m <sup>3</sup>	生活用水 / 亿 m <sup>3</sup>	生态用水 / 亿 m <sup>3</sup>	可利用水资源 总量/ 亿 m <sup>3</sup>
1976	0.27430	0.24730	3.56	28.36
1990	0.39460	0.2837	3.51	29.63
2000	0.74429	0.26768	3.27	28.09
2010	1.09528	0.46550	3.53	31.26
2015	0.98077	0.39453	3.15	28.35

## 2.2.2 绿洲适宜规模

依据构建的玛纳斯河流域绿洲适宜规模计算模型,参考现有研究区  $ET_0$  和  $K_c$  计算成果<sup>[41, 42]</sup>, 将表 4 数据代入模型式 (2) 中, 经计算得到 1976 年、1990 年、2000 年、2010 年以及 2015 年玛纳斯河流域绿洲适宜面积和耕地适宜面积, 见表 5。

表 5 玛纳斯河流域绿洲适宜面积

Tab. 5 Suitable area of oasis in Manas River Basin

年份	$(W-W')$ / 亿 m <sup>3</sup>	$r$ / mm	适宜面积/ km <sup>2</sup>		实际面积/ km <sup>2</sup>		$H_0$
			耕地 $A_c$	总绿洲 $A_s$	耕地 $A_a$	总绿洲 $A$	
1976	24.29	293.6	1 778.2	3 973.7	2 676.3	9 210.2	0.44
1990	25.51	279.8	1 841.3	4 114.6	4 091.2	9 421.6	0.44
2000	23.81	320.1	1 792.6	4 005.8	4 553.3	9 627.8	0.45
2010	26.16	340.5	2 013.7	4 499.8	5 766.5	9 532.7	0.49
2015	23.81	324.5	1 801.6	4 025.9	6 280.9	9 598.5	0.46

由表 5 可知, 从整体上看, 研究时段内玛纳斯河流域绿洲适宜耕地面积与适宜规模变化趋势基本一致, 总体呈波动增加趋势。1976 年玛纳斯河流域绿洲适宜规模为 3 973.7 km<sup>2</sup>, 适宜耕地面积为 1 778.2 km<sup>2</sup>, 到 2015 年绿洲适宜规模和适宜耕地面积分别增长到 4 025.9 km<sup>2</sup> 和 1 801.6 km<sup>2</sup>, 40 年间, 两者适宜面积增加了 52.3 km<sup>2</sup> 和 23.4 km<sup>2</sup>。经分析可以发现, 绿洲适宜面积的增加与节水方式的改变存在很大关系, 1976 年流域处于传统节水阶段, 在这时期, 流域采用库-渠-井联合灌溉, 低效率的灌溉方式, 导致大量水资源浪费, 使可利用水资源量大大减少。自 2000 年膜下滴灌技术在流域被大面积推广之后, 高效的灌溉方式增加了流域可利用水资源量, 使绿洲适宜规模和适宜耕地面积得到增加。根据计算得到的绿洲稳定性指数可以发现, 节水强度的提高, 使绿洲稳定性有所增强, 但五个时期的稳定性指数仍小于临界稳定性数值 0.5, 表明绿洲处于亚稳定状态。由绿洲实际耕地面积可以知, 1976 年耕地面积仅为 2 676.3 km<sup>2</sup>, 到 2015 年

耕地面积高达 6 280.9 km<sup>2</sup>, 40 年间, 耕地面积增加 134.68%。结合绿洲实际规模可以发现, 绿洲实际规模和实际耕地面积均已远远超出适宜规模和适宜耕地面积, 绿洲呈现超负荷运行, 流域可持续发展受到威胁。

## 3 结论

(1) 1976-2015 年玛纳斯河流域绿洲面积呈现“增加-减小-增加”的变化趋势, 但整体朝着扩张的态势发展, 40 年间, 绿洲面积扩张 388.30 km<sup>2</sup>。高效节水技术实施前, 绿洲处于快速扩张期, 面积扩张 417.6 km<sup>2</sup>, 年均扩张 16.70 km<sup>2</sup>。高效节水技术实施后, 绿洲处于缓慢缩减期, 面积缩减 95.1 km<sup>2</sup>, 年均缩减 1.83 km<sup>2</sup>。

(2) 高效节水技术实施前, 人工绿洲面积平均以每年 82.48 km<sup>2</sup> 的速度增长, 天然绿洲面积平均以每年 65.77 km<sup>2</sup> 的速度减小; 高效节水技术实施后, 人工绿洲面积平均以每年 113.21 km<sup>2</sup> 的速度增长, 天然绿洲面积平均以每年 115.04 km<sup>2</sup> 的速度减小。农业高效节水技术的实施有力推动了流域绿洲化进程。

(3) 1976-2015 年玛纳斯河流域绿洲适宜规模和适宜耕地面积均远小于实际规模和实际耕地面积, 提高节水强度, 使绿洲稳定性有所增强, 但仍小于临界稳定性数 ( $H_0 = 0.5$ ), 绿洲稳定性处于亚稳定状态。为保证绿洲稳定, 玛纳斯河流域适宜的绿洲规模和灌溉面积应保持在 4 025.9~4 499.8 km<sup>2</sup> 和 1 801.6~2 013.7 km<sup>2</sup>。

## 参考文献 (References):

- [1] 赖先齐, 王江丽, 张风华, 等. 中国绿洲研究发展进程的探讨与展望[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 663-668. (LAI X Q, WANG J L, ZHANG F H, et al. Discussion and outlook of oasis research and development process in China[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 663-668. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2017.03.24.
- [2] 唐霞, 张志强. 基于文献计量的绿洲研究发展态势分析[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3115-3122. (TANG X, ZHANG Z Q. A bibliometrical analysis of oasis research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(10): 3115-3122. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201501120091.
- [3] ASPINALL R. Modelling land use change with generalized linear models—a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 72(1-2): 91.
- [4] BAKKER M M, GOVERS G, KOSMAS C, et al. Soil erosion as a driver of land use change[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 105(3): 467-481.
- [5] FUSARPOLI P, PALOMBINI E, DAVIES C, et al. Why trans-

- sition risk to psychosis is not declining at the OASIS ultra high risk service: The hidden role of stable pretest risk enrichment [J]. *Schizophrenia Research*, 2017, 19.
- [6] FALCUCCI A, MAIORANO L, BOITANI L. Changes in land use/land cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation[J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22(4): 617-631.
- [7] 冯异星, 罗格平, 周德成, 等. 近 50 a 土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响——以新疆玛纳斯河流域为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4295-4305. (FENG Y X, LUO G P, ZHOU D C, et al. Effects of land use change on landscape pattern of a typical arid watershed in the recent 50 years: a case study on Manas River Watershed in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4295-4305. (in Chinese))
- [8] WANG T, SUN J C, HAN H, et al. The relative role of climate change and human activities in the desertification process in Yulin region of northwest China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2012, 184(12): 7165-7173.
- [9] YANG G, CHEN D, HE X, et al. Land use change characteristics affected by water saving practices in Manas River Basin, China using Landsat satellite images[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2017, 10(6): 123-133.
- [10] 胡顺军, 宋郁东, 田长彦. 渭干河平原绿洲适宜规模[J]. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(S2): 51-57. (HU X J, SONG Y D, TIAN C Y. Suitable scale of the Wei he plain oasis[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2006, 36(S2): 51-57. (in Chinese))
- [11] 凌红波, 徐海量, 刘新华, 等. 新疆克里雅河流域绿洲适宜规模[J]. *水科学进展*, 2012, 23(4): 563-568. (LING H B, XU H L, LIU X H, et al. Suitable scale of oasis in Keriya River basin, Xinjiang[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 563-568. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.04.017.
- [12] 黄领梅, 沈冰, 张高锋. 新疆和田绿洲适宜规模的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(9): 1-4. (HUANG L M, SHEN B, ZHANG G F. Study on the suitable scale for hot an Oasis, Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(9): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2008.09.014.
- [13] 陈亚宁, 陈忠升. 干旱区绿洲演变与适宜发展规模研究——以塔里木河流域为例[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 134-140. (CHEN Y N, CHEN Z S. Analysis of oasis evolution and suitable development scale for arid regions: a case study of the Tarim River Basin[J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2013, 21(1): 134-140. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1011.2013.00134.
- [14] 李玉义, 逢焕成, 陈阜, 等. 新疆玛纳斯河流域灌溉水资源保证程度及提升策略[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 32-42. (LI Y Y, PANG H C, CHEN F, et al. Analysis on the guarantee degree of irrigation water resources and its promotion strategies in Manas River Valley, Xinjiang[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 32-42. (in Chinese))
- [15] 巩杰, 谢余初, 高彦净, 等. 1963-2009 年金塔绿洲变化对绿洲景观格局的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 603-612. (GONG J, XIE Y C, GAO Y J, et al. Spatiotemporal change and its effects on landscape pattern of Jinta Oasis in Arid China from 1963 to 2009[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 603-612. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201304080639.
- [16] 陈伏龙, 王怡璇, 吴泽斌, 等. 气候变化和人类活动对干旱区内陆河径流量的影响——以新疆玛纳斯河流域肯斯特水文站为例[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(4): 692-697. (CHEN F L, WANG Y X, WU Z B, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff of continental river in arid areas——Taking kensiwate hydrological station in Xinjiang Manas River Basin as an example[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(4): 692-697. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2015.04.09.
- [17] LI X, HE X, YANG G, et al. Study on groundwater using visual MODFLOW in the Manas River Basin, China[J]. *Water Policy*, 2016, 18(5).
- [18] 刘志明, 刘少玉, 陈德华, 等. 新疆玛纳斯河流域平原区水资源组成和水循环[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1102-1107. (LIU Z M, LIU S Y, CHEN D H, et al. Water resources composition and water circulation in plain of Manas River Basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1102-1107. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2006.09.012.
- [19] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 等. 新疆玛纳斯河流域景观格局变化及其生态效应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1408-1414. (ZHANG H F, OUYANG Z Y, ZHENG H, et al. Landscape pattern change and its ecological effect in Manas River Basin of Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1408-1414. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.2009.0193.
- [20] 王渊刚, 罗格平, 冯异星, 等. 近 50 a 玛纳斯河流域土地利用/覆被变化对碳储量的影响[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(6): 994-1006. (WANG Y G, LUO G P, FENG Y X, et al. Effects of land use/land cover change on carbon storage in Manas River Watershed over the Past 50 Years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(6): 994-1006. (in Chinese)) DOI: 1000-3037(2013)06-0994-13.
- [21] 富广强, 李志华, 王建永, 等. 季节性冻融对盐荒地水盐运移的影响及调控[J]. *干旱区地理(汉文版)*, 2013, 36(4): 645-654. (FU G Q, LI Z H, WANG J Y, et al. Effects of seasonal freeze thawing on water and salt movement in saline lands[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(4): 645-654. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.04.022.
- [22] 姜亮亮, 刘海隆, 包安明, 等. 玛纳斯河流域景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 256-262. (JIANG L L, LIU H L, BAO A M, et al. Analysis on landscape pattern change and driving mechanism in Manas River Watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(4): 256-262. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.04.050.
- [23] 杨明杰, 杨广, 何新林, 等. 基于系统动力学的玛纳斯河灌区水资源供需平衡分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, (1): 174-180. (YANG M J, YANG G, HE X L, et al. Analysis of water supply and demand balance in Manas River irrigation area based on system dynamics[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, (1): 174-180. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2018.027.
- [24] 丁文学, 陈伏龙, 吴泽斌, 等. 基于条件概率分布的玛纳斯河年径流序列频率分析[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(8): 103-108. (DING W X, CHEN F L, WU Z B, et al. Frequency analysis of the annual runoff series of Manas River Based on condi-

- tional probability distribution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(8): 103-108. (in Chinese) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2017.08.017
- [25] 王永静, 闫周府. 新疆玛纳斯河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 243-250. (WANG Y J, YAN Z F. Evolution and driving forces of water consumption structure in the Manas River Basin in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 243-250. (in Chinese) DOI: 10.13866/j.azr.2017.02.01
- [26] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 等. 新疆玛纳斯河流域2000—2010年土地利用/覆盖变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3211-3223. (LIU J W, JIN T T, LIU G H, et al. Analysis of land use/cover change from 2000 to 2010 and its driving forces in Manas River Basin, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3211-3223. (in Chinese) DOI: 10.5846/stxb201304230781.
- [27] 李赛博, 方曼曼, 王睿, 等. 玛河流域耕地景观动态变化及驱动机制分析[J]. *环境科学与技术*, 2016, (s2): 113-121. (LI S B, FANG M M, WANG R, et al. Research on farmland landscape dynamic change and its driving mechanism in Manas River Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, (s2): 113-121. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2016.S2.021.
- [28] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 1976、1990、2000、2010、2015. (Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Xinjiang statistical yearbook*[M]. China Statistics Publishing House, 1976, 1990, 2000, 2010, 2015. (in Chinese))
- [29] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆生产建设兵团统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 1976、1990、2000、2010、2015. (Xinjiang Production and Construction Corps Statistics Bureau. *Xinjiang Production and Construction Corps Statistical Yearbook*[M]. China Statistics Publishing House, 1976, 1990, 2000, 2010, 2015. (in Chinese))
- [30] 杨涛. 水中长期供求规划探索——以新疆生产建设兵团第八师石河子市为例[J]. *中国水利*, 2014, (17): 17-18. (YANG T. Exploration of long term supply and demand planning in water - Taking Shihezi, the eighth division of Xinjiang production and Construction Corps as an example[J]. *China Water Resources*, 2014, (17): 17-18. (in Chinese))
- [31] 樊自立, 马英杰, 王让会, 等. 干旱区内陆河流域生态系统类型及其整治途径——以新疆为例[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 393-396. (FAN Z L, MA Y J, WANG R H, et al. Ecosystem types in the continental river watershed of arid area and the management approaches—A case study in Xinjiang of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 393-396. (in Chinese))
- [32] 陈超群, 吴煜, 王健, 等. 塔里木河中游人工与天然绿洲相互转化过程与适宜比例探讨[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 42-47. (CHEN C Q, WU Y, WANG J, et al. Artificial and natural oasis mutual converting process and the proper ration in the middle reaches of Tarim River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(3): 42-47. (in Chinese) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2017.03.09.
- [33] 樊自立, 马英杰, 艾力西尔·库尔班, 等. 试论中国荒漠区人工绿洲生态系统的形成演变和可持续发展[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 10-16. (FAN Z L, MA Y J, ALISHIR · K E B, et al. On formation, evolution and sustainable development of artificial oasis ecosystem in desert area in China[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 10-16. (in Chinese))
- [34] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): F9. (WANG T. Review and prospect of research on oasis fication and desertification in arid regions[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1): F9. (in Chinese))
- [35] 王忠静, 王海峰, 雷志栋. 干旱内陆河区绿洲稳定性分析[J]. *水利学报*, 2002, 33(5): 0026-0031. (WANG Z J, WANG H F, LEI Z D. Stability analysis of oasis in arid region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(5): 0026-0031. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2002.05.006.
- [36] 丁建丽, 张滢, 王宏卫. 干旱区绿洲稳定性评价指标体系构建及其应用分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 31-36. (DING J L, ZHANG Y, WANG H W. Establishment of evaluative index system of oasis stability and its application[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(2): 31-36. (in Chinese) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2008.02.012.
- [37] 邓宝山, 瓦哈甫·哈力克, 张玉萍, 等. 吐鲁番绿洲适宜规模及其稳定性分析[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(4): 797-803. (DENG B S, WAHAP · H L K, ZHANG Y P, et al. Appropriate scale and stability of oasis in Turpan[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(4): 797-803. (in Chinese) DOI: 10.13866/j.azr.2015.04.24.
- [38] 张丽, 盛建东, 蒋平安. 玛纳斯河流域耕地利用潜力评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, (4): 338-342. (ZHANG L, SHENG J D, JIANG P A. Utilization potential of cultivated land in Manas River Basin, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 4): 338-342. (in Chinese) DOI: 10.13254/j.jare.2015.0071.
- [39] 曹志超, 王新平, 李卫红, 等. 基于水热平衡原理的塔里木河下游绿洲适宜规模分析[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(5): 806-814. (CAO Z C, WANG X P, LI W H, et al. Suitable scale for oasis in lower reaches of Tarim River[J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(5): 806-814. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2012.05.013.
- [40] 常浩娟, 刘卫国, 吴琼. 玛纳斯河流域用水分析、需水预测和影响因素[J]. *节水灌溉*, 2017, (7): 88-93. (CHANG H J, LIU W G, WU Q. Water consumption, requirement forecast and influence factors of Manas River Basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017, (7): 88-93. (in Chinese))
- [41] 王健, 吕新, 王江丽. 北疆地区参考作物蒸散量时空变化特征[J]. *干旱气象*, 2015, 33(1): 63-69. (WANG J, LV X, WANG J L. Change characteristics of reference crop evapotranspiration in the Northern Xinjiang[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(1): 63-69. (in Chinese) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0063.
- [42] 张山涛, 普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 73-79. (ZHANG S Q, PU Z C. Temporal and spatial variation characteristics of reference evapotranspiration in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(5): 73-79. (in Chinese) DOI: 1002-6819(2011)-05-0073-07.