

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.002

# 基于地表径流量预测的玛纳斯河流域绿洲适宜规模计算

薛联青<sup>1,2</sup>, 倪涛<sup>1</sup>, 刘远洪<sup>1</sup>, 廖淑敏<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院水利工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:** 基于神经网络算法和水热平衡原理, 结合水文、气象数据, 构建了玛纳斯河绿洲适宜规模模型, 分析计算了 1990—2020 年绿洲适宜规模与现状规模, 预测了 2021—2030 年流域地表径流量和绿洲适宜规模。结果表明: 1990—2000 年、2001—2010 年、2011—2020 年绿洲适宜规模分别为 11 003.3 km<sup>2</sup>、9 902.8 km<sup>2</sup> 和 9 075.2 km<sup>2</sup>, 现状规模分别为 13 388 km<sup>2</sup>、14 095 km<sup>2</sup> 和 14 548 km<sup>2</sup>, 稳定系数分别为 0.46、0.43 和 0.40; 2021—2030 年玛纳斯河流域平均地表径流量为 30.05 亿 m<sup>3</sup>, 绿洲适宜规模为 8 555.6 km<sup>2</sup>; 绿洲处于亚稳定状态, 为保证未来绿洲的稳定发展, 应使其处于适宜规模下。  
**关键词:** 绿洲适宜规模; 地表径流; 水热平衡; 径流量预测; 神经网络; 小波分析; 回归分析; 玛纳斯河  
**中图分类号:** TV213.4   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1004-6933(2021)01-0007-07

**Calculation of suitable scale of oasis in Manas River Basin based on surface runoff prediction**// XUE Lianqing<sup>1,2</sup>, NI Tao<sup>1</sup>, LIU Yuanhong<sup>1</sup>, LIAO Shumin<sup>1</sup> (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Wanjiang University of Technology, Maanshan 243000, China)

**Abstract:** Based on the neural network algorithm and the principle of water and heat balance, combined with hydrological and meteorological data, the suitable scale model of Manas River Oasis is constructed. The suitable scale and current scale of oasis from 1990 to 2020 are analyzed and calculated, and the surface runoff and the suitable scale of oasis from 2021 to 2030 are predicted. The results show that the suitable scale of oasis is 11 003.3 km<sup>2</sup>, 9 902.8 km<sup>2</sup> and 9 075.2 km<sup>2</sup> in 1990-2000, 2001-2010 and 2011-2020, respectively, and the current scale is 13 388 km<sup>2</sup>, 14 095 km<sup>2</sup> and 14 548 km<sup>2</sup>, and the stability coefficients are 0.46, 0.43 and 0.40, respectively. From 2021 to 2030, the average surface runoff of Manas River Basin is 3.005 billion m<sup>3</sup>, and the suitable scale of oasis is 8 555.6 km<sup>2</sup>. The oasis is in sub stable state, so it should be in the appropriate scale to ensure the stable development of oasis in the future.

**Key words:** suitable scale of oasis; surface runoff; water and heat balance; runoff forecast; neural network; wavelet analysis; regression analysis; Manas River

新疆绿洲既是生态敏感和环境退化区, 又是社会经济发展的核心区<sup>[1]</sup>, 同时玛纳斯河流域绿洲作为新疆绿洲区的重要组成部分, 它位于天山北坡经济带的中心, 是新疆生产力高度集中、经济基础最雄厚的地区<sup>[2]</sup>, 流域的经济发展对环境和资源的压力不断加重<sup>[3]</sup>, 为了玛纳斯河流域的稳定、持续及健康的发展, 必须保证绿洲的发展不能超过其适宜规模。

针对绿洲适宜规模的研究, 国外学者涉足较少。国内的发展历程可追溯到 20 世纪 80 年代末期, 陈昌煜等<sup>[4]</sup>根据年实际水资源量以及绿洲和耕地的需水量指标, 确定了基本能保持各县市自然生态平

衡的适宜绿洲和耕地面积。到了 20 世纪 90 年代中期, 李小明等<sup>[5]</sup>提出了“适度绿洲”的定义, 建立了塔南绿洲生态系统可持续发展的数学模型。进入 21 世纪后, 王忠静等<sup>[6]</sup>率先提出将水热平衡理论应用于绿洲稳定性分析中, 利用水热平衡理论计算绿洲适宜面积以及绿洲适宜耕地面积, 用以指导绿洲的合理规划; 之后, Hao 等<sup>[7]</sup>、凌红波等<sup>[8]</sup>、邓宝山等<sup>[9]</sup>、曹志超等<sup>[10]</sup>和胡顺军等<sup>[11]</sup>分别利用该理论对黑河干流中游地区、新疆克里亚河流域、吐鲁番地区、塔里木河下游地区及渭干河平原地区做了稳定性评价, 结果表明, 目前国内的绿洲现状规模总体大于绿洲适宜规模, 因此绿洲的稳定性正遭受威胁。

基金项目: 国家自然科学基金(51779074, 41371052)

作者简介: 薛联青(1973—), 女, 教授, 博士, 主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: 244570668@qq.com

近几年有学者开始对玛纳斯河流域进行了适宜规模评价,结果均表明玛纳斯河流域实际规模远大于绿洲适宜规模<sup>[12-13]</sup>。

上述研究偏重于绿洲在现状条件下的适宜规模,研究成果虽然可以展现绿洲当前稳定状态,但对于未来绿洲如何发展却无法提供指导。当前“以水定地”正逐渐成为学者们研究绿洲适宜规模的核心思想,玛纳斯河流域作为干旱内陆河流域,其可利用水资源量90%以上来自地表径流,地表径流的变化基本决定了未来绿洲适宜规模的变化趋势,因此本文基于地表径流量的预测建立了未来绿洲适宜规模模型,以期对玛纳斯河流域未来的发展提供参考。

## 1 研究区概况

玛纳斯河流域位于新疆天山北麓、准噶尔盆地南缘,行政区域包括石河子市、沙湾县和玛纳斯县,以及分布在两县境内的新疆生产建设兵团农八师和农六师的农牧团场<sup>[14]</sup>,流域地理位置位于 $43^{\circ}05'N \sim 45^{\circ}59'N$ 、 $84^{\circ}42'E \sim 86^{\circ}40'E$ ,流域总面积为 $3.41 \text{万 km}^2$ ,属于典型的西北干旱区内陆河流域类型(图1)。流域远离海洋、气候干燥,既有中温带大陆性干旱气候特征,又有垂直气候特征,属于典型的大陆性气候。流域冬冷夏热,日温差较大,光照充足,热量丰富,雨量稀少,蒸发量大<sup>[15]</sup>。玛纳斯河流域绿洲开发历史悠久,但规模一直较小,1900年之前开发规模仅为 $25 \text{万 hm}^2$ <sup>[16]</sup>。近年来随着干旱区节水灌溉技术的大面积推广,有效地推动了绿洲化进程,使绿洲规模不断扩大<sup>[17]</sup>,截至2018年,玛纳斯河流域绿洲现状规模达到 $14\,548 \text{ km}^2$ 。

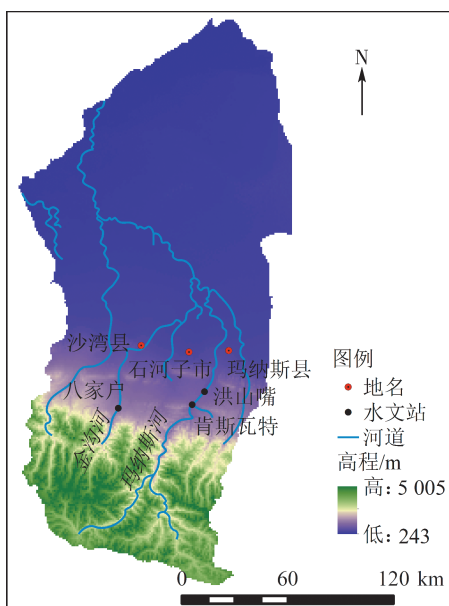


图1 玛纳斯河流域概况

Fig.1 Overview of Manas River Basin

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

1900年、2000年、2018年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);径流数据来源于玛纳斯河流域出山口水文站,包括肯斯瓦特、八家户和洪山嘴站,序列长度为1967—2018年;气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),气象站点包括沙湾和玛纳斯站,序列长度为1967—2018年;社会经济数据来源于国家数据网、《新疆生产建设兵团统计年鉴》《新疆统计年鉴》以及《水资源公报》,主要包括人口数据、工业GDP数据和牲畜数量数据;用水定额数据来源于全国节约用水办公室官方网站新疆维吾尔自治区定额标准,包括工业用水定额、居民用水定额以及牲畜养殖用水定额。

### 2.2 绿洲分类

根据绿洲的形成机理<sup>[18]</sup>,将玛纳斯河流域划分为天然绿洲和人工绿洲。采用中国科学院资源环境科学数据中心的遥感数据,并根据流域土地利用实际情况对土地利用栅格数据进行重新分类,将天然绿洲划分为林地(有林地、灌木林、疏林地)、草地(低覆盖草地、中覆盖草地、高覆盖草地)和水域(河流、湖泊、滩地)3类;人工绿洲划分为耕地(水田、旱地)、林地(采伐迹地、各类园林、未成林造林地)、建筑用地(城镇用地、农村居民点用地、其他建设用地)和水域(水库、坑塘)4类。

### 2.3 地表径流量预测模型的建立

玛纳斯河流域的地表径流主要源于降水和冰山融雪,其量的大小受水文气象要素影响显著<sup>[19-20]</sup>,不同季节影响的程度也不一样,可见地表径流与这些要素之间无法用线性关系拟合,而神经网络模型对变量与因变量之间的非线性关系拟合效果非常好,因此本文采用多层神经网络(multi-layer perceptron, MLP)模型对未来玛纳斯河流域地表径流量进行预测。

MLP共有3层结构,分别是输入层、隐含层和输出层。输入层的节点个数为输入变量的个数,通过对玛纳斯河流域地表径流与水文气象要素之间进行相关性分析,发现流域蒸发量、降水量和气温三要素与地表径流量呈极显著相关关系( $P < 0.01$ ),日照时数和湿度与地表径流量呈显著相关关系( $P < 0.05$ ),因此将这5个要素作为本次模型的输入变量;输出层的节点个数为输出变量的个数,本研究只需预测地表径流量,因此输出变量只有一个,MLP的数学表达式<sup>[21]</sup>为

$$\begin{cases} y_m = f_2 \left( \sum_{j=1}^k w_{jm} z_j - \gamma_m \right) \\ z_j = f_1 \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} x_i - \theta_j \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $x_i$ 为输入层； $z_j$ 为隐含层； $y_m$ 为输出层； $w_{ij}$ 为输入层第*i*个神经元与隐含层第*j*个神经元之间的连接权； $w_{jm}$ 为隐含层第*j*个神经元与输出层第*m*个神经元之间的连接权； $f_1$ 为隐藏层的激活函数，本研究选用双曲正切函数； $f_2$ 为输出层的激活函数，本研究选取恒等函数； $\theta_j$ 、 $\gamma_m$ 均为阈值。

选择1967—2018年的水文气象要素(包括流域的蒸发量、降水量、气温、日照时数和湿度)作为该模型的输入变量,将地表径流量作为输出变量,利用随机数1和0分配模拟与验证数据,其中1代表模拟数据,占比70%;0代表验证数据,占比30%。所有参数设置完成后,模型的模拟效果如图2所示。

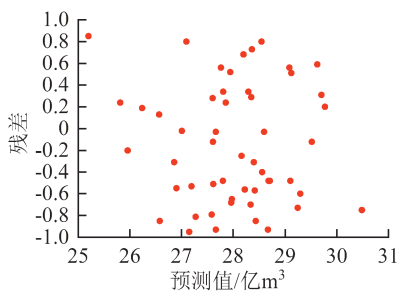


图2 地表径流量预测残差分析

Fig. 2 Residual analysis of surface runoff prediction

经过对所有输入数据的训练,结果显示模型模拟过程中的相对误差为11%,验证误差仅为6.8%,均在GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》许可的误差20%内,结合图2发现模型的预测残差值90%以上都位于 $\pm 0.5$ 之间,这些结果均表明该预测模型效果较好,模拟结果可信,可以作为流域地表径流量的预测模型。

## 2.4 玛纳斯河流域水文气象要素预测

未来的绿洲适宜规模需要水文气象要素作为输入变量,因此对玛纳斯河流域未来水文气象要素的变化趋势研究也必不可少。流域水文气象要素通常都具有随时间变化的趋势性和周期性<sup>[22]</sup>,因此本文采用小波分析和回归分析法对玛纳斯河流域各气象要素进行模拟预测。如图3所示,降水量、蒸发量、气温、日照时数和湿度拟合出的相对误差分别为13%、5.3%、6.9%、2.5%和1.8%,模拟精度全部都达到了85%以上,大多数变量的模拟精度都达到了90%以上,模拟结果可信。

## 2.5 绿洲适宜规模计算

基于生态学中的水热平衡原理,建立绿洲适宜规模计算模型<sup>[6]</sup>:

$$A = \frac{W - W'}{(ET_0 - P)K_p H_0} \quad (2)$$

$$W = W_{\text{总}} - W_{\text{生态}} \quad (3)$$

$$W_{\text{总}} = W_{\text{地表}} + W_{\text{不重复}} \quad (4)$$

式中: $A$ 为流域绿洲适宜面积, $\text{km}^2$ ;  $W$ 为绿洲水资源可利用量,亿 $\text{m}^3$ ;  $W'$ 为绿洲年内工业及人畜用水量,

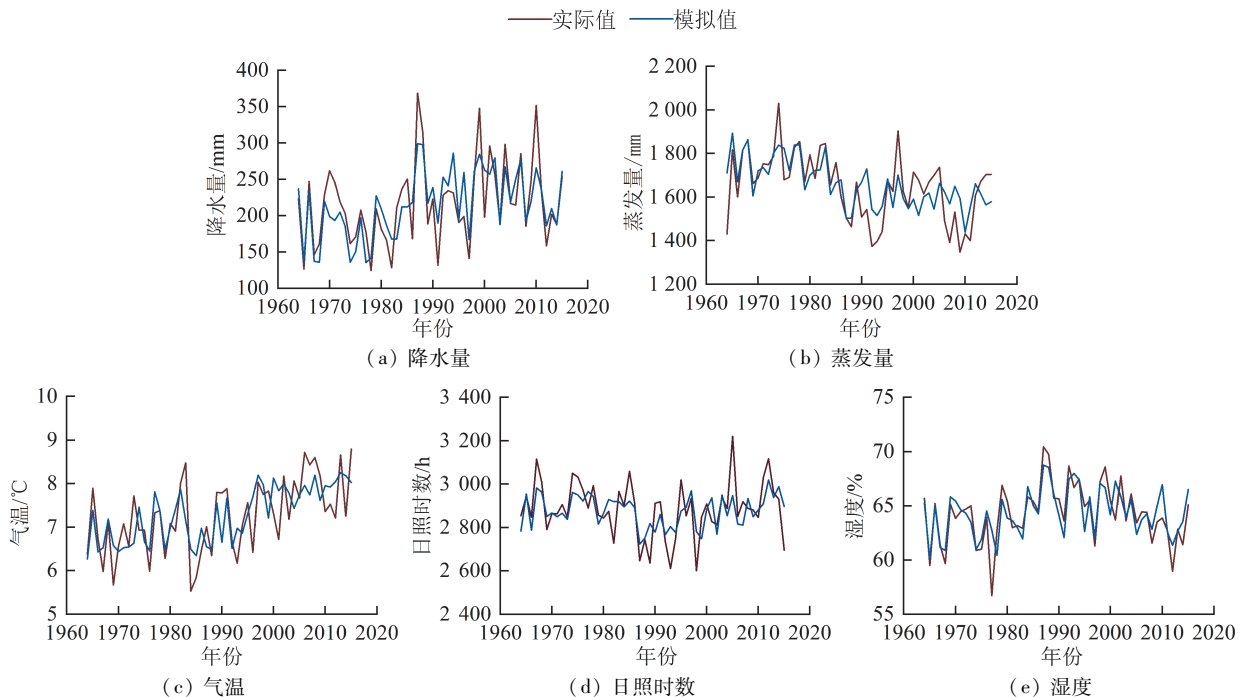


图3 玛纳斯河流域水文气象要素模拟结果

Fig. 3 Simulation results of hydrometeorological elements in Manas River Basin

亿  $m^3$ , 参考文献[13]和[17]的方法计算, 因其对绿洲植被生长无贡献, 计算中将其扣除;  $ET_0$  为按彭曼公式计算的参考作物蒸散发量, mm, 本文利用 FAO 发布的  $ET_0$  计算器计算得到;  $P$  为绿洲年内降水量, mm, 可通过气象数据统计出;  $K_p$  为绿洲内主要植物的综合作物系数;  $H_0$  为绿洲设计绿度, 是一定水资源保证下绿洲充分给水程度, 同时也可将其作为评定实际绿洲是否稳定的指标, 划分等级如表 1 所示;  $W_{总}$  为玛纳斯河流域水资源总量, 亿  $m^3$ ;  $W_{生态}$  为河道内生态环境需水量, 亿  $m^3$ , 按照地表径流量的 10% ~ 20% 计算, 结合玛纳斯河流域实际情况, 参考《水资源可利用量估算方法(试行)》取为 10%;  $W_{地表}$  为地表径流量, 亿  $m^3$ ;  $W_{不重复}$  为地下水资源和地表径流不重复量, 亿  $m^3$ , 根据玛纳斯河流域以往的水文地质普查以及水资源综合评价资料, 2000 年地下水资源和径流年均不重复量为 2.52 亿  $m^3$ , 结合地下水均衡分析发现, 玛纳斯河流域地下水资源量正以每年约 1.5% 的速率下降<sup>[23-25]</sup>。

表 1 绿洲稳定性评价指标划分<sup>[17]</sup>

评价等级	$H_0$	绿洲生态趋势	绿洲规模评价
超稳定	[0.75, 1]	异质性将增加	绿洲面积可以扩大
稳定	[0.50, 0.75)	保持平衡	绿洲面积在有可靠措施下, 可谨慎扩大
亚稳定	[0.20, 0.50)	开始出现退化	绿洲需要较高的投入才能保持稳定
不稳定	[0, 0.20)	退化	必须缩小绿洲规模以保持局部稳定

通过查阅相关市县年鉴发现, 玛纳斯河流域主要农作物有棉花、玉米和小麦, 其他作物包括番茄、大豆以及葡萄等, 采用 FAO 推荐的双作物系数法公式计算各作物的作物系数, 其中, 棉花、玉米和小麦的作物系数分别为 0.70、0.73 和 0.78, 次要作物统一归为其他作物, 作物系数取平均值 0.73。将这些农作物在不同阶段的种植比例统计出来, 加权平均得到综合作物系数  $K_p$ , 计算结果见表 2。

表 2 玛纳斯河流域绿洲作物种植比例及综合作物系数  
Table 2 Crop planting proportion and comprehensive crop coefficient of oasis in Manas River Basin

时间	作物种植比例/%				综合作物系数
	棉花	小麦	玉米	其他作物	
1990—2000 年	62	10	5	23	0.72
2001—2010 年	69	12	6	13	0.72
2011—2020 年	73	4	7	16	0.71
平均值	68	9	6	17	0.71

### 3 结果与分析

#### 3.1 绿洲现状规模分析

绿洲规模与水资源可利用量之间存在着巨大的

关联, 而玛纳斯河农业用水占据水资源可利用量的 90% 以上, 绿洲农业用水结构基本决定了绿洲规模发展的方向, 从 2000 年开始玛纳斯河流域采用大规模的节水灌溉技术, 因此本研究以 2000 年为界, 统计了 1990 年、2000 年和 2018 年的土地利用情况, 分析了近 30 年玛纳斯河流域绿洲土地利用转化情况, 分析结果见表 3。

表 3 玛纳斯河流域 1990—2018 年土地利用变化情况

年份	人工绿洲	天然绿洲	未利用土地
1990	4700	8556	20810
2000	4931	8457	20678
2018	6355	8193	19518

从表 3 可以发现, 1990—2000 年人工绿洲面积从 4700  $km^2$  增长到 4931  $km^2$ , 增幅为 231  $km^2$ , 年均增长为 23.1  $km^2$ , 天然绿洲从 8556  $km^2$  减少至 8457  $km^2$ , 减幅为 99  $km^2$ , 年均减少 9.9  $km^2$ ; 用水结构<sup>[26]</sup> 改变后, 人工绿洲面积增长幅度明显, 由 2000 年的 4931  $km^2$  增长到 2018 年的 6355  $km^2$ , 增长了 1424  $km^2$ , 年均增长为 79.1  $km^2$ , 与此同时, 天然绿洲面积仍在减少, 从 2000 年 8457  $km^2$  减少至 2018 年的 8193  $km^2$ , 年均减少 14.7  $km^2$ , 与 2000 年之前相比, 减小速率加快。国内学者研究表明, 干旱区人工绿洲面积与天然绿洲面积比例不应超过 2:3, 当前玛纳斯河流域人工绿洲和天然绿洲比例已超过此值, 因此玛纳斯河绿洲正处于退化状态<sup>[27]</sup>。

#### 3.2 玛纳斯河流域水文气象要素分析

经过统计计算和模型的预测分析, 得到了玛纳斯河流域不同阶段的水文气象要素数据, 并根据式(3)(4)计算了水资源可利用量, 结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 1970—2020 年玛纳斯河流域地表径流量呈现出波动增加的趋势, 水资源可利用量与其变化趋势保持一致; 蒸发量在 20 世纪 90 年代发生显著降低, 进入 21 世纪后虽然有所回升, 但幅度不大; 降水量总体呈现出波动上升的趋势; 气温保持持续上升态势; 日照时数和相对湿度变化一直处于波动状态。可见, 蒸发量对地表径流量呈现负反馈效应, 而降水量和温度对地表径流量呈现正反馈效应, 日照时数和相对湿度对其影响相对较小。

同时预测结果显示 2021—2030 年绿洲蒸发量为 1601.46 mm, 较前期有所降低, 而降水量和气温都呈增加的趋势, 最终得出玛纳斯河流域地表径流量为 30.05 亿  $m^3$ , 水资源可利用量为 28.77 亿  $m^3$ , 较之前有所增加, 这一结果也印证了上述规律, 同时

表4 玛纳斯河流域各阶段水文气象数据统计

Table 4 Hydrometeorological data statistics of Manas River Basin at different stages

时间	蒸发量/mm	降水量/mm	气温/°C	日照时数/h	相对湿度/%	地表径流量/亿 m <sup>3</sup>	水资源可利用量/亿 m <sup>3</sup>
1970—1980年	1696.33	199.39	6.62	2918.09	62.92	26.18	27.25
1981—1990年	1783.71	190.01	6.73	2925.98	63.18	26.78	27.28
1991—2000年	1585.49	218.21	7.30	2818.08	65.94	29.07	28.88
2001—2010年	1559.28	238.96	7.91	2907.65	64.24	28.54	28.03
2011—2020年	1608.71	231.55	8.03	2919.69	62.65	29.04	28.14
2021—2030年	1601.46	249.59	8.23	2892.61	62.87	30.05	28.77

也与徐素宁等<sup>[28]</sup>和高培等<sup>[29]</sup>对玛纳斯河流域气候变化的研究保持一致。

### 3.3 玛纳斯河流域生产生活用水量分析及预测

采用参考文献[13]和[17]的计算方法和预测方法分析玛纳斯河流域各阶段生活用水量、工业用水量以及牲畜用水量,结果如表5所示。

表5 玛纳斯河流域用水量

Table 5 Water consumption of Manas River Basin

时间	亿 m <sup>3</sup>			
	生活用水	工业用水	牲畜用水	合计
1990—2000年	0.24	0.57	0.05	0.86
2001—2010年	0.26	1.08	0.07	1.41
2011—2020年	0.30	2.81	0.13	3.24
2021—2030年	0.34	5.61	0.22	6.17

从表5可以看出生活用水、工业用水和牲畜用水均呈现逐步增加的趋势,其中工业用水量增幅最为明显,在2020—2030年间工业用水量占生产生活用水总量的91%,可见工业用水逐渐成为绿洲用水的一大动力。

目前玛纳斯河流域地表径流量虽有所增加,但绿洲生产生活用水增加速度远高于前者,这就导致能够提供给植被耗水的量越来越少,绿洲适宜规模也因此逐年减小,实际绿洲面积与适宜绿洲面积越来越大,绿洲的稳定性变得越来越差。根据研究发现,过去几十年,玛纳斯河流域棉花等经济作物种植比例持续增加,综合作物系数逐渐降低,可见增加作物系数小的作物种植比例可以有效降低绿洲作物的耗水量<sup>[30-31]</sup>,同时试验表明,在膜下滴灌条件下沙漠绿洲区的棉花作物系数甚至可以达到0.43<sup>[32]</sup>,因此为了玛纳斯河流域的稳定,可以适当调整农作物的种植比例,优先考虑种植作物系数较小的作物,针对作物在不同灌溉模式下作物系数的大小,调整

灌溉方式,以提高绿洲稳定性。

### 3.4 绿洲适宜规模及稳定性分析

采用式(2)计算玛纳斯河流域绿洲适宜规模,并对其现状稳定性进行评价,结果如表6所示。

由表6可知,玛纳斯河流域绿洲适宜规模在1990—2000年、2001—2010年和2011—2020年分别为11003.3 km<sup>2</sup>、9902.8 km<sup>2</sup>和9075.2 km<sup>2</sup>,同时地表径流量与降水量虽然都呈现增加的趋势,但由于生产生活用水量增加速度远大于地表径流量与降水量的增速,导致玛纳斯河绿洲适宜面积在2021—2030年依然保持减小趋势,其值为8555.6 km<sup>2</sup>。因此,为了保证绿洲的稳定发展,2021—2030年绿洲适宜规模应处于8555.6 km<sup>2</sup>以内。

同时引入稳定系数来评价绿洲的稳定状态,由表6可知,1990—2020年玛纳斯河流域绿洲的稳定系数一直低于0.5,处于亚稳定状态,绿洲开始出现退化并且有加速退化的趋势,因此必须缩小玛纳斯河人工绿洲面积,加快退耕还林速度,严格遵循国务院颁布的最严格水资源管理制度三条红线的指导意见,使天然绿洲与人工绿洲的比例达到适宜状态,以提高玛纳斯河流域绿洲稳定性。

## 4 结论

a. 1990—2000年间玛纳斯河流域人工绿洲面积年均增长23.1 km<sup>2</sup>,天然绿洲年均减少9.9 km<sup>2</sup>; 2001—2020年人工绿洲面积年均增长79.1 km<sup>2</sup>,天然绿洲面积年均减少14.7 km<sup>2</sup>,较前期减小速率加快,人工绿洲与天然绿洲比值已超过适宜比例。

b. 1970年以来,玛纳斯河流域气温呈现总体上升的趋势,冰山融雪速度加快,同时降水量也在持续增加,使得玛纳斯河流域地表径流量呈现出总体

表6 玛纳斯河流域绿洲适宜面积

Table 6 Suitable area and stability evaluation of oasis in Manas River Basin

时间	可利用水资源量/亿 m <sup>3</sup>	生产生活用水/亿 m <sup>3</sup>	ET <sub>0</sub> /mm	P/mm	K <sub>p</sub>	绿洲适宜面积/km <sup>2</sup>	绿洲实际面积/km <sup>2</sup>	稳定系数
1990—2000年	28.88	0.86	930.3	218.21	0.72	11003.3	13388	0.46
2001—2010年	28.03	1.41	989.3	238.96	0.72	9902.8	14095	0.43
2011—2020年	28.14	3.24	1004.2	231.55	0.71	9075.2	14548	0.40
2021—2030年	28.77	6.17	993.1	249.00	0.71	8555.6		

增加的趋势,据预测,2021—2030年间玛纳斯河流域的地表径流量将达到30.05亿 $m^3$ 。

c. 玛纳斯河流域在1990—2000年、2001—2010年和2011—2020年3个阶段的适宜绿洲面积分别为11 003.3  $km^2$ 、9 902.8  $km^2$ 和9 075.2  $km^2$ ,均小于现状条件下的绿洲面积,处于亚稳定状态,因此为了保证玛纳斯河流域的稳定,2021—2030年绿洲适宜面积应保持在8 555.6  $km^2$ 以内。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张军民. 干旱区生态安全问题及其评价原理:以新疆为例[J]. 生态环境, 2007(4): 1328-1332. (ZHANG Junmin. The ecological safety and its assessment principle in arid; a case of Xinjiang[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2007(4): 1328-1332. (in Chinese))
- [ 2 ] 凌红波,徐海量,史薇,等. 新疆玛纳斯河流域绿洲生态安全评价[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2219-2224. (LING Hongbo, XU Hailiang, SHI Wei, et al. Ecological safety assessment of Manas River Basin oasis, Xinjiang [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2219-2224. (in Chinese))
- [ 3 ] 包晓斌. 流域生态红线管理制度建设[J]. 水利经济, 2019, 37(4): 5-8. (BAO Xiaobin. Watershed eco-red line management system in China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(4): 5-8. (in Chinese))
- [ 4 ] 陈昌毓. 河西走廊实际水资源及其确定的适宜绿洲和耕地面积[J]. 干旱区地理, 1989(4): 20-27. (CHEN Changyu. Actual water resource and its definition of the area suitable for oasis and farmland in the Hexi Corridor, GanSu Province[J]. Arid Land Geography, 1989(4): 20-27. (in Chinese))
- [ 5 ] 李小明,张希明. 塔克拉玛干沙漠南缘绿洲生态系统[J]. 干旱区研究, 1995, 12(4): 10-16. (LI Xiaoming, ZHANG Ximing. Oasis ecosystem in the southern edge of Taklimakan Desert [J]. Arid Zone Research, 1995, 12(4): 10-16. (in Chinese))
- [ 6 ] 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(5): 26-30. (WANG Zhongjing, WANG Haifeng, LEI Zhidong. Stability analysis of oasis in arid region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(5): 26-30. (in Chinese))
- [ 7 ] HAO Lina, SU Xiaoling, ZHANG Lan, et al. Suitable oasis and cultivated land scales in arid regions based on ecological health[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 33-42.
- [ 8 ] 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 Hongbo, XU Hailiang, LIU Xinhua, et al. Suitable scale of oasis in Keriya River Basin, Xinjiang [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(4): 563-568. (in Chinese))
- [ 9 ] 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 Baoshan, WAHAP Halik, ZHANG Yuping, et al. Appropriate scale and stability of oasis in Turpan [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 797-803. (in Chinese))
- [ 10 ] 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 Zhichao, WANG Xiping, LI Weihong, et al. Suitable scale for oasis in lower reaches of Tarim River [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(5): 806-814. (in Chinese))
- [ 11 ] 胡顺军,宋郁东,田长彦,等. 渭干河平原绿洲适宜规模[J]. 中国科学, D辑:地球科学, 2006(S2): 51-57. (HU Shunjun, SONG Yudong, TIAN Changyan, et al. Suitable scale of oasis in Weiganhe plain [J]. Scientia Sinica, 2006(S2): 51-57. (in Chinese))
- [ 12 ] YANG Guang, LI Fadong, CHEN Dong, et al. Assessment of changes in oasis scale and water management in the arid Manas River Basin, North Western China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 691: 506-515.
- [ 13 ] 王静,刘海隆,王玲. 气候变化背景下玛纳斯河流域绿洲适宜规模研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 113-120. (WANG Jing, LIU Hailong, WANG Ling. Suitable oasis scale in Manas River Basin in the context of climate change [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 113-120. (in Chinese))
- [ 14 ] 冯异星,罗格平,周德成,等. 近50a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 Yixing, LUO Geping, ZHOU Decheng, 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))
- [ 15 ] 魏玲玲. 玛纳斯河流域水资源可持续利用研究[D]. 石河子:石河子大学, 2014.
- [ 16 ] 杨发相. 新疆玛纳斯河流域的土地利用与退化问题[J]. 新疆环境保护, 2002(1): 8-12. (YANG Faxiang. Some problems on the land use and degradation in Manas River Watershed, Xinjiang [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2002(1): 8-12. (in Chinese))
- [ 17 ] 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 Dong, YANG Guang, LI Fadong, 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))
- [ 18 ] 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(4):49-52. (FAN Zili, MA Yingjie, WANG Ranghui, 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(4):49-52. (in Chinese))
- [19] 段建军,曹晓莉,沈永平,等. 天山南坡渭干河流域地表水资源量及其变化趋势[J]. 冰川冻土,2010,32(6):1211-1219. (DUAN Jianjun, CAO Xiaoli, SHEN Yongping, et al. Surface water resources and its trends in Weigan River Basin on the south slope of Tianshan, China during 1956—2007 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(6):1211-1219. (in Chinese))
- [20] 郑锦涛,陈伏龙,张鑫厚,等. 新疆玛纳斯河年径流频率分析[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):68-74. (ZHENG Jintao, CHEN Fulong, ZHANG Xinhou, et al. Annual runoff frequency analysis of the Manas River in Xinjiang [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(1):68-74. (in Chinese))
- [21] 张乐,汪传旭. 基于GM(1,1)-MLP神经网络组合模型的物流总额预测[J]. 上海海事大学学报,2018,39(4):58-62. (ZHANG Le, WANG Chuanxu. Total logistics amount forecasting based on GM(1,1)-MLP neural network combination model [J]. Journal of Shanghai Maritime University,2018,39(4):58-62. (in Chinese))
- [22] 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1259-1266. (LI Changbin, WANG Shuaibing, YANG Linshan, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe River Basin from 1951 to 2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(5):1259-1266. (in Chinese))
- [23] 张叶,刘兵,何新林,等. 干旱灌区地下水位动态变化及驱动因素分析[J]. 节水灌溉,2017(6):63-67. (LIU Ye, LIU Bing, HE Xinlin, et al. Change of groundwater depth and impact factors in arid irrigation area [J]. Water Saving Irrigation,2017(6):63-67. (in Chinese))
- [24] 李玉义,张海林,张凤华,等. 新疆玛纳斯河流域农业水资源可利用潜力分析[J]. 自然资源学报,2007(1):44-50. (LI Yuyi, ZHANG Hailin, ZHANG Fenghua, et al. Analysis on the potential of the available agriculture water resources in Manas River Valley, Xinjiang [J]. Journal of Natural Resources,2007(1):44-50. (in Chinese))
- [25] 王文明. 天山北麓三水转化与地下水库调蓄研究[D]. 西安:长安大学,2007.
- [26] 范嘉炜,黄锦林,袁明道,等. 广州市用水结构空间均衡差异性分析[J]. 水资源保护,2020,36(4):82-86. (FAN Jiawei, HUANG Jinlin, YUAN Mingdao, et al. Analysis of spatial equilibrium of water consumption structure in Guangzhou City [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):82-86. (in Chinese))
- [27] 张鹏,赵新风,王希义,等. 干旱区典型流域人工与天然绿洲相互转化过程与适宜比例:以开都-孔雀河流域为例[J]. 中国农村水利水电,2018(2):41-47. (ZHANG Peng, ZHAO Xinfeng, WANG Xiyi, et al. Artificial and natural oasis mutual converting process and the proper ration in the typical basin of arid land;taking the Kaidu-Kongque River Basin as an example [J]. China Rural Water and Hydropower,2018(2):41-47. (in Chinese))
- [28] 徐素宁,杨景春,李有利. 近50a来玛纳斯河流量变化及对气候变化的响应[J]. 地理与地理信息科学,2004(6):65-68. (XU Suning, YANG Jingchun, LI Youli. Fluctuations of discharge rate of Manas River and its response to climatic changes during the recently 50 years [J]. Geography and Geo-Information Science,2004(6):65-68. (in Chinese))
- [29] 高培,魏文寿,刘明哲. 玛纳斯河流域绿洲区气候变化特征分析与预测[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(6):161-167. (GAO Pei, WEI Wenshou, LIU Mingzhe. Variation of temperature and precipitation in recent 44 years in the oases in Manas River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(6):161-167. (in Chinese))
- [30] 范文波,吴普特,马枫梅. 膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析:以新疆玛纳斯河流域棉花为例[J]. 生态学报,2012,32(23):7559-7567. (FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei. Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (23): 7559-7567. (in Chinese))
- [31] 刘方平,汪文超,邓海龙,等. 鄱阳湖流域典型稻田水量平衡分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):100-103. (LIU Fangping, WANG Wenchao, DENG Hailong, et al. Water balance analysis of typical paddy fields in Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection,2019,35(6):100-103. (in Chinese))
- [32] 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等. 沙漠绿洲灌区膜下滴灌作物需水量及作物系数研究[J]. 农业工程学报,2004(5):97-100. (ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya, et al. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated crop under mulch in Minqin County Oasis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004(5):97-100. (in Chinese))

(收稿日期:2020-02-28 编辑:彭桃英)