

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.007

新疆绿洲格局变化与生态耗水结构分析

李梦怡^{1,2}, 邓铭江³, 凌红波⁴, 邓晓雅⁵, 闫俊杰⁶, 焦阿永⁷

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;
3. 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所,
新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 6. 伊犁师范大学,
新疆 伊宁 835000; 7. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为准确评估新疆绿洲格局变化与生态耗水结构, 综合应用遥感信息技术和统计学方法, 从省域和水资源分区2个尺度系统研究20世纪90年代以来新疆绿洲的演变格局, 分析绿洲生态耗水特性, 揭示社会经济耗水与生态耗水之间的比例关系。结果表明, 人工绿洲和天然绿洲的面积之比由0.625:1演变为1.3:1, 其生态耗水总量分别由1990年的125.0亿 m^3 和45.8亿 m^3 增至2018年的182.2亿 m^3 和71.9亿 m^3 , 呈波动增长的变化趋势; 在空间上, 绿洲耗水呈“北高南低”的分布格局。新疆生态耗水总量为329.7亿 m^3 , 其中天然生态系统的耗水量为218.0亿 m^3 , 与总可利用水量之比分别为49.6%和32.8%。

关键词: 生态耗水; 水资源三级区; 绿洲格局; 耗水结构

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)05-0719-12

绿洲作为干旱区一种独有的生态景观, 以3%~5%的面积承载了干旱区90%以上的人口, 是干旱区的核心^[1]。绿洲的形成和发展受水资源的制约, 具有“唯水性”^[2]。全球气候变暖加剧了水循环过程, 进而引起水资源时空格局和总量的变化, 可能打破了绿洲系统原有的平衡, 导致部分绿洲的退化^[3]。另外, 在大规模、高强度的水土资源开发利用下, 绿洲系统的生态用水被大量挤占, 区域生态保护与经济发展之间的矛盾将进一步激化。因此, 深入研究绿洲的演变格局和耗水特性, 实现绿洲适宜格局下的耗水结构合理对统筹区域经济发展和生态环境保护具有重大意义。

现阶段, 针对绿洲景观格局变化、绿洲土地利用与植被覆被转化和绿洲稳定性等方面已开展了大量研究^[4-5]。然而, 这些研究主要集中于流域、城市、灌区和绿洲-荒漠过渡带等区域单元^[6-8], 对省域和水资源三级区下绿洲格局演变和结构变化仍缺乏系统性分析。绿洲的形成和发展必然会改变区域水资源供需状况, 及时准确地把握绿洲生态耗水的动态变化对于实现绿洲水资源高效配置至关重要。国内外关于绿洲生态耗水计算已进行了较为深入的探讨, 常用的耗水计算方法包括面积定额法、潜水蒸发法、水量平衡法和遥感法等^[9-11]。这些研究在揭示绿洲演变、植被和气象要素对生态耗水的综合影响方面仍存在不足, 且缺乏对生态耗水结构的定量分析。综上, 本研究亟需解决的科学问题是解析绿洲格局演变下的耗水过程与机理, 旨在保障绿洲适宜格局下的耗水结构合理。

本文采用 Landsat 5 土地利用数据和全球陆表特征参数(GLASS)蒸散产品数据, 分析1990年以来新疆绿洲及其耗水的演变格局, 求解各水资源三级区绿洲生态耗水的定量结果, 分析新疆各水资源三级区生态耗水机理和过程, 揭示新疆社会经济耗水和生态耗水结构特征, 以为保障新疆绿洲的生态安全和其他区域绿洲

收稿日期: 2023-05-22; 网络出版日期: 2023-10-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.p.20231010.1316.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52179028); 新疆水利科技专项基金项目(XSKJ-2023-08)

作者简介: 李梦怡(1993—), 女, 山西太原人, 博士研究生, 主要从事生态水文过程方面研究。tjdxlmy21@163.com

通信作者: 凌红波, E-mail: ling19830612633@163.com

的水土资源合理开发提供科学指导。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

新疆地处亚欧大陆腹地，面积约 160 万 km^2 ，位于 $73^{\circ}40'E-96^{\circ}23'E$ 、 $34^{\circ}25'N-49^{\circ}10'N$ 之间，是全球最典型的干旱区之一。气候类型属于典型的温带大陆性气候，干旱少雨，蒸散发强烈。北部的阿尔泰山、南部的昆仑山和横贯中部的天山将地区分割为南北两大部分，呈现出“三山夹两盆”的地貌格局(图 1)。山区孕育的河流分布于盆地边缘，为绿洲提供充沛水源；平原区水资源稀缺，植被稀疏，被广袤的荒漠覆盖，由此构成了山区-绿洲-荒漠为主的生态系统。新疆河流交错，湖泊广袤，河川径流量约为 893.1 亿 m^3 ，域内水资源空间分布不均匀，北部高于南部，东部高于西部。

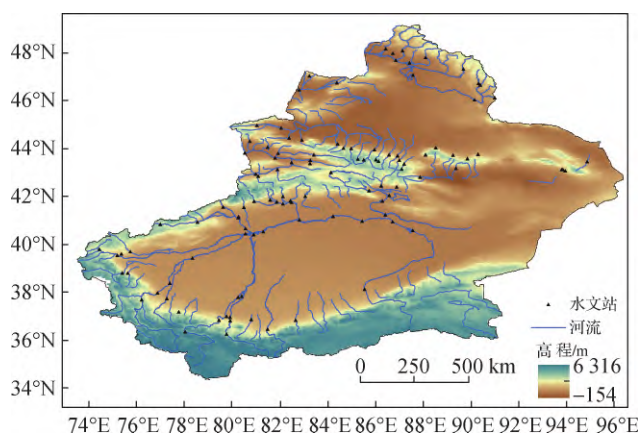


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the research area

1.2 数据来源

采用的土地利用数据为美国国家航空航天局(NASA)发布的 Landsat 系列数据，分辨率为 30 m，选择 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年生长季且云量小于 10% 的影像数据。借助 Google earth 的高分辨率影像，采用目视解译的方法判读 Landsat 5 的 4 期影像，得到研究区土地利用分布图。为了保证数据的判读精度，在研究区随机选样并对数据点分类验证，结果表明数据精度达到 90% 以上，满足后续的研究要求。

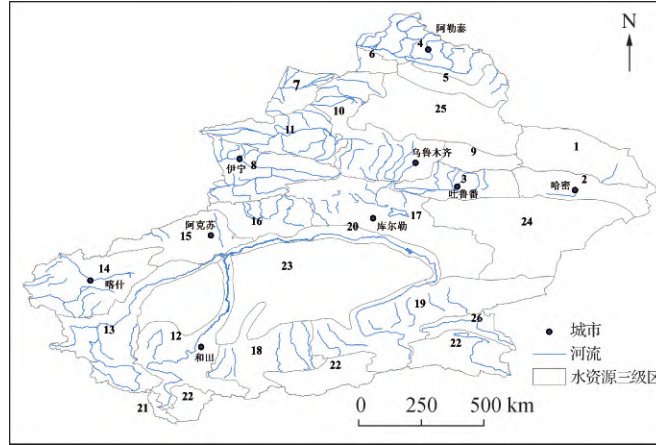
水体面积的反演在 GEE(Google Earth Engine) 云平台上操作，数据源为 Landsat 5 号、7 号和 8 号生成的 JRC Global Surface Water 全球地表水数据集，时间跨度为 1990—2020 年，空间分辨率为 30 m；蒸散数据来源于 1990—2018 年全球陆表特征参数的潜热通量产品(GLASS ET)，空间分辨率为 1 km，时间分辨率为 8 d，该产品数据表征日潜热通量均值(W/m^2)，经过单位转换，将日潜热通量转为日蒸散量(mm/d)，再合成年均蒸散量；植被数据和气象数据分别来自 1990—2018 年 NASA 和英国国家大气科学中心(NCAS) 开发的 GIMMS NDVI3g 产品和 CRU TS 地表气象月数据集，空间分辨率分别为 8 km 和 0.5° ，本研究使用的水文数据来自《新疆水资源公报》和《全国第三次水资源调查评价成果》。

1.3 研究方法

1.3.1 绿洲的分类

以新疆水资源三级区(图 2)作为基本研究单元，扣除 21—26 号无人区。根据绿洲的发生机制和覆被特

征将 20 个水资源三级区分为人工绿洲和天然绿洲。



水资源分区

- | | | | | |
|----------|----------|------------|------------|--------------|
| 1 巴伊盆地 | 7 额敏河 | 13 叶尔羌河 | 19 车尔臣河诸小河 | 25 古尔班通古特荒漠区 |
| 2 哈密盆地 | 8 伊犁河 | 14 喀什噶尔河 | 20 塔里木河干流 | 26 柴达木盆地西部 |
| 3 吐鲁番盆地 | 9 东段诸河 | 15 阿克苏河 | 21 奇普恰普河 | |
| 4 额尔齐斯河 | 10 中段诸河 | 16 渭干河 | 22 羌塘高原区 | |
| 5 乌伦古河 | 11 艾比湖水系 | 17 开孔河 | 23 塔克拉玛干沙漠 | |
| 6 吉木乃诸小河 | 12 和田河 | 18 克里亚河诸小河 | 24 库木塔格沙漠 | |

图 2 新疆水资源三级区

Fig. 2 Third-class water resource regions in Xinjiang

1.3.2 水体蒸发耗水计算

采用自动水体提取指数(I_{AWE})提取新疆地表水体面积^[12]。该指数通过抑制阴影和深色表面的分类噪声来提高水体提取的准确性,相较于其他水体指数, I_{AWE} 较稳定且波段区间相对较窄,能很好地刻画形状复杂的地表水体信息。 I_{AWE} 的计算公式如下:

$$I_{AWE} = 4(\rho_{Gre} - \rho_{SW1}) - 0.25\rho_{NIR} + 2.75\rho_{SW2} \quad (1)$$

式中: ρ_{Gre} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SW1} 、 ρ_{SW2} 分别为绿光、近红外波段、短波红外 1 波段和短波红外 2 波段的反射率。由于新疆水体面积处于长期变化的状态,利用 1990—2020 年平均水体面积进行后续计算(表 1)。采用水面蒸发模型计算新疆的水体耗水,计算公式为

$$E = \alpha AE_{\phi} \quad (2)$$

式中: α 为水面蒸发折算系数^[13]; A 为研究区域的多年平均水面面积, km^2 ; E_{ϕ} 为蒸发皿年蒸发量, mm 。

1.3.3 趋势分析和显著性检验

为了深入认识新疆绿洲植被和水文因子的演变规律,本文采用线性回归法,通过计算 Slope 值^[14-15]研究植被和绿洲耗水量的趋势变化;利用 Mann-Kendall 非参数检验法进行显著性检验,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

1.3.4 土地利用转移分析

土地利用转移矩阵是定量描述土地类型间相互转化的重要方法,能够具体反映土地利用的动态变化^[16]。本文运用土地利用转移矩阵分析 1990—2020 年新疆绿洲的演变过程。

表 1 新疆水资源三级区湖泊和坑塘水库等水体多年平均面积

Table 1 Multi-year average area of lakes, ponds and reservoirs in third-class water resource regions in Xinjiang

水资源 三级区	坑塘、水体 面积/万 km ²	湖泊	湖泊面积/ 万 km ²	水资源 三级区	坑塘、水体 面积/万 km ²	湖泊	湖泊面积/ 万 km ²
巴伊盆地	5.0	巴里坤	87.7	艾比湖水系	71.9	艾比湖	637.1
哈密盆地	0.5	—	—	和田河	13.3	—	—
吐鲁番盆地	1.9	—	—	叶尔羌河	169.1	—	—
额尔齐斯河	170.6	—	—	喀什噶尔河	46.8	—	—
乌伦古河	229.1	吉力湖	169.4	阿克苏河	167.5	艾西曼湖	30.7
		乌伦古湖	856.3	渭干河	38.7	—	—
吉木乃诸小河	0.2	—	—	开孔河	368.3	博斯腾湖	985.7
额敏河	9.7	—	—	克里亚河诸小河	4.8	—	—
伊犁河	93.0	—	—	车尔臣河诸小河	5.1	—	—
东段诸河	5.0	托勒库勒湖	22.7	塔里木河干流	118.8	琼库勒	18.1
		柴窝堡湖	17.5			台特玛湖	114.8
		盐湖	20.6			巴依库孜勒湖	15.7
中段诸河	189.6	艾里克湖	50.8	合计	1 708.7	—	3 134.6
		玛纳斯湖	107.5				

2 结果与分析

2.1 新疆绿洲的时空变化特征

表 2 表征了 1990—2020 年新疆绿洲面积的动态变化。天然绿洲面积不断缩减, 2000 年、2010 年和 2020 年天然绿洲面积较 1990 年分别减小了 6.1%、16.3% 和 25.5%; 人工绿洲面积波动增长, 在 1990—2020 年间增长了 66.1%。天然绿洲集中分布在北疆的额尔齐斯河和南疆的塔里木河干流中下游、车尔臣河诸小河、叶尔羌河与和田河的部分地区; 人工绿洲主要分布在中段诸河、伊犁河、阿克苏河和喀什噶尔河等地区(图 3(a)、图 3(b))。利用土地利用转移矩阵分析绿洲的时空演变特征(表 3, 图 3(c))。经过近 30 a 的演变, 人工绿洲总面积增加了 4.0 万 km², 主要通过天然绿洲转入与非绿洲区扩张实现, 其中由天然绿洲净转出 2.5 万 km², 非绿洲区转移面积为 1.5 万 km²。天然绿洲净转入人工绿洲的区域主要聚集在北疆的中段诸河、艾比湖水系、伊犁河和南疆的叶尔羌河、阿克苏河, 其余区域零散分布。

表 2 1990—2020 年人工绿洲和天然绿洲面积动态变化

Table 2 Dynamic change of artificial oasis and natural oasis area in 1990—2020

单位: 万 km²

年份	天然绿洲	人工绿洲	绿洲面积
1990 年	9.8	5.9	15.7
2000 年	9.2	6.8	16.0
2010 年	8.2	6.5	14.7
2020 年	7.3	9.8	17.1

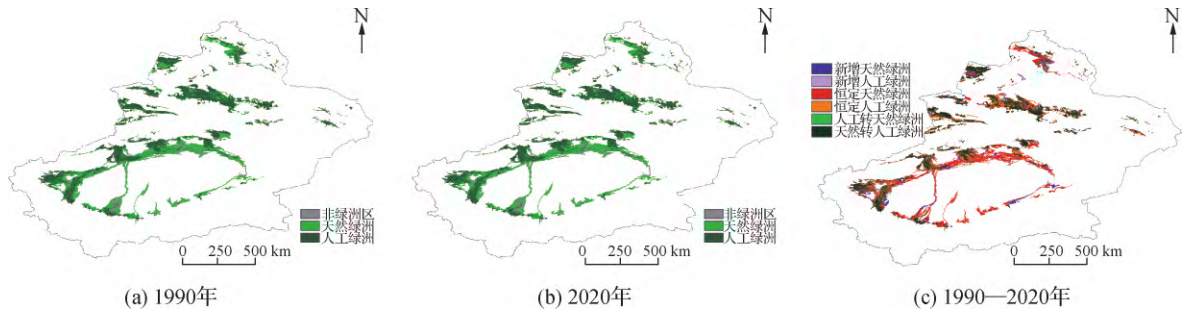


图 3 1990—2020 年新疆绿洲分布与空间差值

Fig. 3 Distribution map of oasis and spatial difference in Xinjiang in 1990—2020

表 3 1990—2020 年天然-人工绿洲土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transition matrix of the natural oasis-artificial oasis in 1990—2020

单位: 万 km²

类型	天然绿洲	人工绿洲	其他	1990 年合计
天然绿洲	5.3	3.3	1.2	9.8
人工绿洲	0.4	5.4	0.1	5.9
其他	1.6	1.2	2.8	5.6
2020 年合计	7.3	9.9	4.1	21.3

2.2 新疆绿洲耗水特性

分别计算 1990—1999 年、2000—2009 年和 2010—2018 年新疆绿洲年均耗水量(图 4)。从图 4 可知,新疆绿洲耗水量呈北高-南低的空间格局。北疆的中段诸河、伊犁河、艾比湖水系为 3 段时期耗水量的高值聚集区(>500 mm);额尔齐斯河、乌伦古河和额敏河,叶尔羌河、渭干河和开孔河的部分区域为较高值的分布区(300~500 mm);年均耗水量<300 mm 的地区主要集中在叶尔羌河下游、塔里木河干流、和田河、车尔臣河诸小河和克里亚河诸小河。这是由于新疆北部的降雨相对南部更丰沛,为植被的生长提供了额外的水源,故北部耗水量较高^[17-18]。

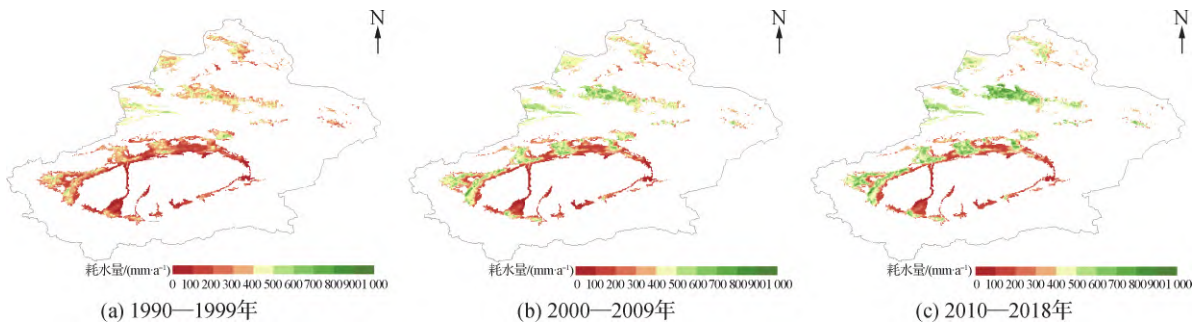


图 4 新疆绿洲年均耗水量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average annual water consumption in Xinjiang oasis

图 5 计算了各格点耗水量的增速。3 个研究时段中耗水量呈增长趋势的格点占比分别为 67.9%、50.1% 和 98.9%,对应的增速分别为 2.9、1.1 和 40.4 mm/a。增速高值区集中分布在北部的中段诸河和南部的渭干河、喀什噶尔河和叶尔羌河。2010—2018 年耗水增速较前 2 个时段更高,车尔臣河诸小河耗水量增速最

低,为 21.8 mm/a; 艾比湖水系耗水量增速最高,为 53.6 mm/a。因此,新疆绿洲耗水量整体呈增长趋势,其中 2010—2018 年耗水量增幅明显。

结合水资源三级区绿洲覆被和绿洲矢量边界,提取植被的面积,与耗水量相乘得到人工绿洲和天然绿洲的植被耗水总量(图 6)。人工绿洲和天然绿洲植被耗水总量均呈波动增长趋势。1990—2018 年间,人工绿洲的植被耗水量由 45.8 亿 m^3 增至 71.9 亿 m^3 ,增幅为 57.0%;天然绿洲植被耗水量由 125.0 亿 m^3 增至 182.2 亿 m^3 ,增幅为 45.8%。在 2000—2009 年,人工绿洲和天然绿洲植被的年均耗水量分别为 62.7 亿 m^3 和 163.9 亿 m^3 ,较 1990—1999 年分别增长了 22.3% 和 24.0%。在 2010—2018 年,人工绿洲年均耗水量为 70.5 亿 m^3 ,较 2000—2009 年增长了 12.1%;天然绿洲年均耗水量为 174.2 亿 m^3 ,增幅为 6.9%。2010—2018 年均绿洲植被总耗水量为 244.7 亿 m^3 ,较 2000—2010 年和 1990—2000 年分别增加了 8.4% 和 34.7%。

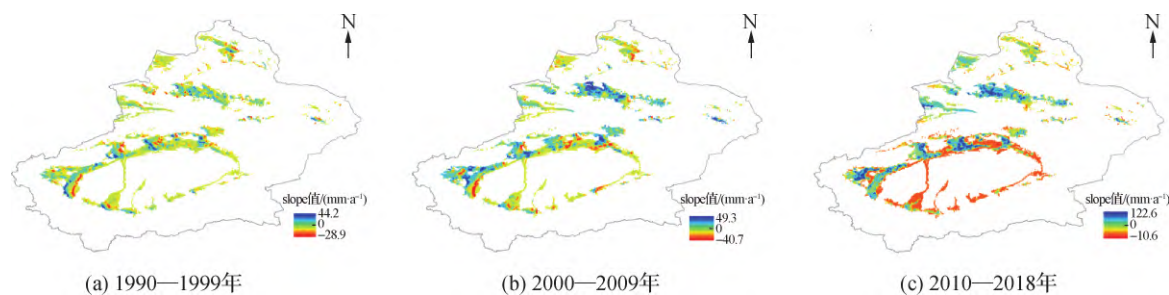


图 5 1990—2018 年新疆绿洲年均耗水变化率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of average annual water consumption change rate in Xinjiang oasis from 1990—2018

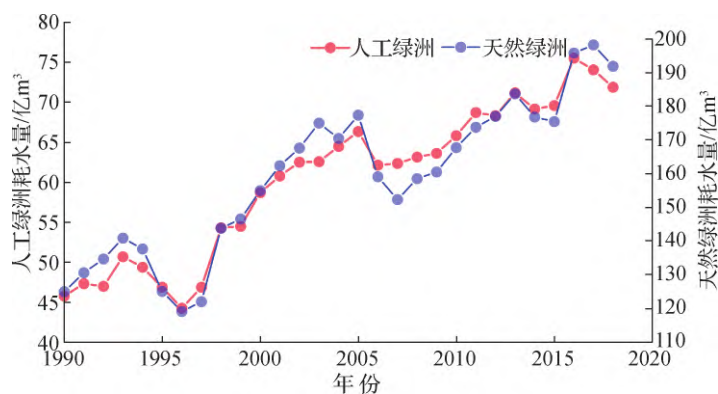


图 6 1990—2018 年人工和天然绿洲的植被逐年耗水总量

Fig. 6 Total annual water consumption of vegetation in artificial and natural oasis from 1990—2018

图 7 给出各水资源三级区人工绿洲和天然绿洲的植被耗水总量。中段诸河、叶尔羌河和喀什噶尔河在 1990—2018 年间,人工绿洲耗水总量较其他水资源分区更多;吉木乃诸小河、巴伊盆地和克里亚河诸小河人工绿洲耗水总量较其他水资源分区更少。中段诸河和喀什噶尔河的人工绿洲耗水总量增量最明显,分别为 4.3 亿和 4.1 亿 m^3 ;吉木乃诸小河、巴伊盆地、吐鲁番盆地、和田河、车尔臣诸小河和克里亚河诸小河的耗水总量变化不明显,其中东段诸河增量最大,为 0.39 亿 m^3 ,吉木乃诸小河最小,仅 0.02 亿 m^3 ;塔里木河天然绿洲耗水总量明显高于其他分区;哈密盆地、吐鲁番盆地和巴伊盆地的天然绿洲耗水总量较其他分区较低;塔里木河干流和叶尔羌河天然绿洲耗水增量较大,分别由 26.5 亿和 13.0 亿 m^3 增至 47.5 亿和 23.1 亿 m^3 ,对应增幅分别为 79.1% 和 77.7%;其余水资源分区的天然绿洲耗水大多呈微弱增长的趋势。

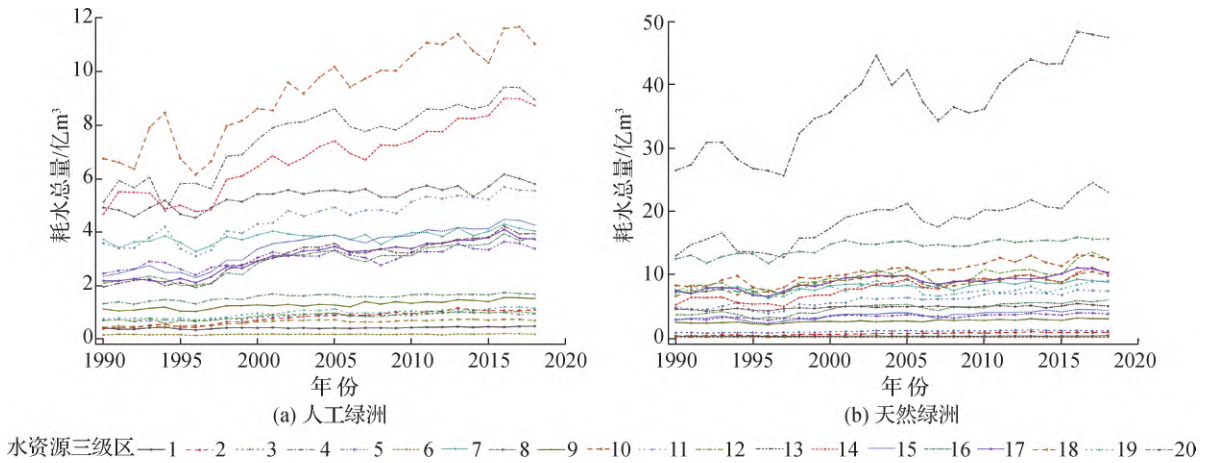


图 7 1990—2018 年不同水资源三级区植被耗水总量

Fig. 7 Total water consumption of vegetation in different third-class water resource regions in 1990—2018

2.3 新疆耗水结构分析

本研究的生态耗水包括天然生态系统耗水和人工生态系统耗水。

(1) 天然生态系统耗水。采用 Slope 值分析和 Mann-Kendall 显著性检验分别对新疆 20 个水资源三级分区的天然植被变化趋势进行识别, 进而将植被覆被变化划为显著增长、非显著变化和显著减小 3 类(图 8)。结果表明, 植被覆被的变化趋势具有一定的空间异质性。其中, 植被呈显著增长的栅格占总栅格的 23.6%, 在此区域内, 南疆呈显著增长的面积占比最大, 为 56.4%, 其次为北疆, 为 40.8%, 东疆最小, 仅 2.8%; 植被呈显著减小的面积占比 32.3%, 在此区域内, 南疆占比最大, 为 68.3%, 其次为北疆, 28.8%, 东疆最小, 为 2.9%。44.1% 的区域植被未发生显著变化, 在此区域内, 南疆、北疆和东疆面积的占比分别为 57.4%、40.0% 和 2.6%。

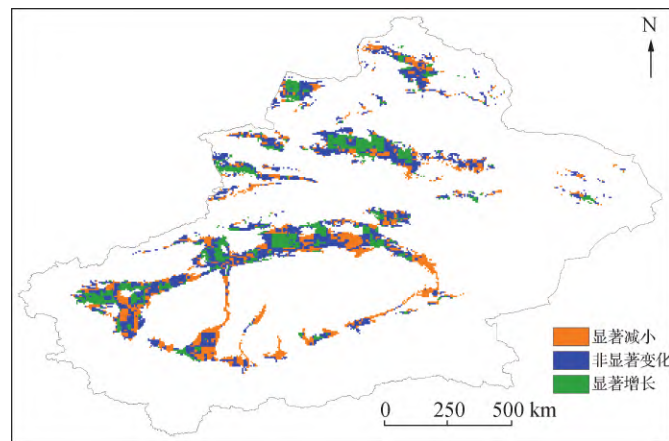


图 8 1990—2018 年新疆水资源三级区植被变化趋势

Fig. 8 Vegetation change trend in third-class water resource regions in Xinjiang in 1990—2018

对于显著增长的栅格, 选择发生突变年后的植被耗水均值作为生态耗水量; 对于不显著变化和显著减小的栅格, 统计近 10 a 天然植被耗水均值作为生态耗水量。二者之和可视为维持植被现状条件的生态耗水量, 为 179.3 亿 m^3 (图 9(a))。利用水体指数和水面蒸发模型计算新疆天然河湖生态耗水量(图 9(b)), 为

38.7 亿 m^3 。开孔河的湖泊生态耗水量最大,为 11.9 亿 m^3 ; 乌伦古河和艾比湖水系的湖泊生态耗水量依次减小,分别为 11.3 亿和 8.4 亿 m^3 ; 东段诸河的湖泊耗水量最小,为 0.3 亿 m^3 。

(2) 人工生态系统耗水。统计 2010—2018 年人工绿洲植被耗水均值作为人工绿洲耗水量,为 69.8 亿 m^3 。利用水面蒸发模型计算得水库、坑塘、洼地等水体生态耗水量为 20.2 亿 m^3 ,北疆和南疆的水体耗水量分别为 9.0 亿和 11.1 亿 m^3 ,占总耗水量的比例分别为 44.6% 和 55.0%。开孔河水体耗水量最大,为 4.0 亿 m^3 ,其次为乌伦古河、中段诸河和叶尔羌河,耗水量均为 2.5 亿 m^3 ; 东部的哈密盆地,吐鲁番盆地和北部的吉木乃诸小河的水体耗水量最小,均不足 0.1 亿 m^3 。本研究根据新疆林业与草原局提供的数据,东疆、北疆和南疆的农田防护林面积分别为 0.03 万、0.24 万和 0.21 万 km^2 。参考《新疆维吾尔自治区农业灌溉用水定额: DB65/T 3611—2014》,利用面积定额法得到新疆农田防护林生态耗水量为 21.7 亿 m^3 。北疆需水量最大,为 10.8 亿 m^3 ; 其次为南疆,为 9.5 亿 m^3 ; 东疆最小,为 1.4 亿 m^3 。

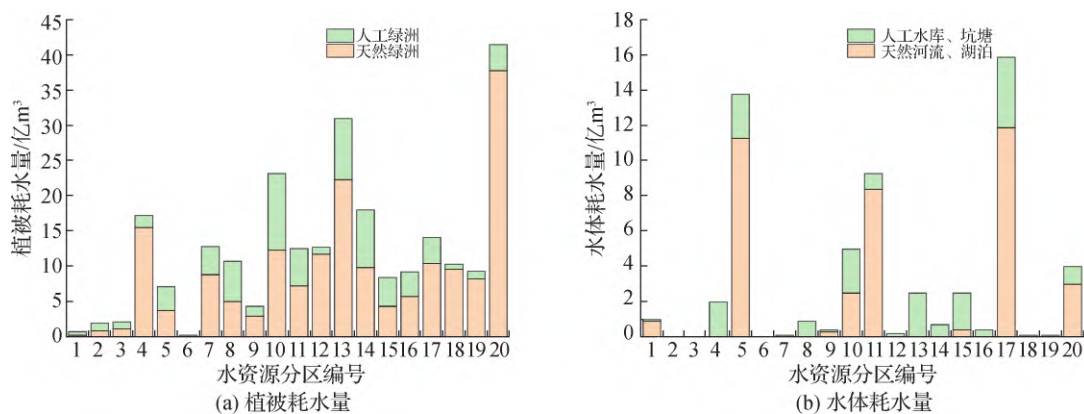


图9 新疆水资源三级区植被和水体生态耗水量

Fig.9 Ecological water consumption of vegetation and water body in third-class water resource regions in Xinjiang

根据以上计算结果,分析得到新疆现状水资源三级区的生态耗水量。新疆生态耗水总量为 329.7 亿 m^3 ,其中,绿洲植被总耗水量为 249.1 亿 m^3 ,占生态耗水总量的 75.6%; 坑塘、水库等水体的耗水量为 20.2 亿 m^3 ,占比为 6.1%; 河湖耗水量为 38.7 亿 m^3 ,占总耗水量的 11.7%; 农田防护林生态耗水量为 21.7 亿 m^3 ,占总耗水量的 6.6%。天然生态系统耗水量 218.0 亿 m^3 ,其中,天然绿洲植被生态耗水量为 179.3 亿 m^3 ,河湖生态耗水量为 38.7 亿 m^3 。人工生态系统耗水量为 111.7 亿 m^3 ,其中,人工植被生态耗水量为 91.5 亿 m^3 ,坑塘水库等水体耗水量为 20.2 亿 m^3 。已有的水文资料显示,新疆人类活动区可耗水量为 665.4 亿 m^3 。因此,新疆现状生态耗水总量(329.7 亿 m^3)与可耗水总量之比为 49.6%; 用于维护天然生态系统的耗水量(218.0 亿 m^3)与总可用水量之比为 32.8%。

3 讨 论

新疆生态耗水的测算始终是优化水资源配置研究的重点。为了论证生态耗水量计算结果的合理性,与已有的研究结果进行对比(表 4),除文献[19, 21]的耗水核算结果偏小外,本研究与其余评价结果基本一致。这与近年来新疆水文情势的好转有关,2001—2016 年全疆年平均河川径流较 1980—2001 年年平均河川径流增加了 11.2%,径流总体呈偏丰状态^[24]。对 1990—2018 年降雨进行空间趋势分析和 M-K 显著性检验(图 10(a)),结果表明 83.7% 的格点呈不显著增长的趋势。在文献[19]中,人工系统生态耗水与本研究差异较大,产生这一差异的原因是新疆人工绿洲和水体面积的扩张,生态耗水量增长。值得注意的是,近 30 a 来,新疆天然绿洲规模缩减了 25.5%(表 2),但天然系统生态耗水与文献[20]的结果相近。另外,如图 10(b)

所示, 60.2% 的区域气温呈显著增长趋势。因此这一现象可以解释为: 在水文情势好转和持续增温的共同影响下^[25], 水资源耗散强度不断提高, 相较于 1990—1999 年, 2010—2018 年的平均耗水量增加了 38.9% (图 4)。因而, 天然绿洲面积减小, 天然系统生态耗水仍呈增长趋势。总体而言, 由于不同研究选取的计算方法、评估范围和研究时段的不同, 评估结果可能存在一定差异。

表 4 本研究计算的新疆生态耗水量与已有研究成果对比

Table 4 Comparison between the ecological water consumption in Xinjiang calculated in this study and the existing research results

来源	发布时间	计算方法	(天然 + 人工) 耗水量/亿 m ³
文献[19]	1995 年	面积定额	(208.4 + 45.6)
文献[20]	1995 年	面积定额	237.9
文献[21]	2001 年	遥感解译法	208.6
文献[22]	2001 年	面积定额法	345
文献[23]	2012 年	面积定额法	(209.6 + 107.2)
本研究	2023 年	遥感解译法、面积定额法、统计资料法	(218.0 + 111.7)

注: 人工为人工生态系统生态耗水; 天然为天然生态系统生态耗水。

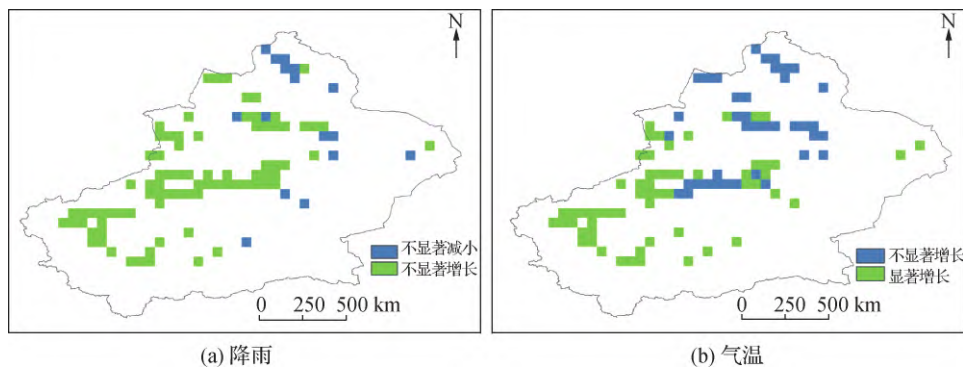


图 10 1990—2018 年新疆降雨和气温变化趋势空间分布

Fig. 10 Spatial distribution map of precipitation and temperature change trends in Xinjiang in 1990—2018

天然绿洲在绿洲生态系统的占比对干旱区可持续发展起着至关重要的作用。以往研究表明, 新疆人工绿洲与天然绿洲的合理比例在 1:1 左右, 红线比例为 1.5:1^[22]。在 1990—2020 年间, 人工绿洲和天然绿洲的面积比例由 0.625:1 演变至 1.3:1, 绿洲比例已超过合理比例, 逐渐趋于红线。为此, 在保障天然绿洲植被现状规模不再缩减的前提下, 应严格控制人工绿洲的开发规模, 积极修复严重退化的天然绿洲面积。

研究生态耗水与社会经济耗水的比例关系, 可以为统筹区域生态保护和经济发展奠定理论基础。根据 2022 年新疆水资源公报的数据, 从社会经济耗水角度推算, 新疆可用水资源量为 617.1 亿 m³, 其中用于人类活动的水量为 444.8 亿 m³, 占比为 72.1%, 推算得生态耗水量为 293.2 亿 m³, 占用水总量的 47.5%。这与 2.3 节的计算结果相符。因此, 新疆现状耗水结构基本满足“在西北干旱区, 流域耗水量的总和应不超过可用水资源量的 70%; 其中, 生态环境和社会经济系统的耗水占比以各 50% 为宜”的内陆河水资源调控要求^[26]。然而, 这一计算结果是新疆水文情势好转的前提下推算出的。此外, 本研究未考虑新疆地下水超采量。在此背景下, 计算得新疆天然植被耗水量在 2010—2018 年的年均值为 244.7 亿 m³, 较 2000—2010 年和 1990—2000 年分别增加了 8.4% 和 34.7%, 此时生态耗水总量占人类活动区可耗水量的 49.0%, 天然生态系统耗水量占人类活动区可耗水量的 32.4% (图 5)。然而, 在枯水年和平水年条件下, 新疆生态耗水总量分

别为264.1亿和293.1亿 m^3 ，分别占人类活动区可耗水量的39.7%和44.0%，显然难以满足“生态环境和社会经济系统的耗水占比以各50%为宜”的调控要求。由此可见，未来随着丰水周期的结束，加之持续增温引起的耗水强度增加，维系这一合理耗水结构将面临严重挑战。综上，应控制地下水超采，实施流域水资源管理制度，保障水量分配落实到位，权衡生态环境和社会经济耗水。此外，新疆生态耗水总量显著增长，但仍有32.3%的植被面积覆被显著减小，应优化流域工程布局和生态灌溉模式，提高水分利用效率^[27]。

4 结 论

本文应用遥感信息技术和统计学方法，利用土地利用数据和全球陆表特征参数蒸散数据，从省域和水资源分区2个尺度分析了1990年以来新疆绿洲格局及生态耗水的演变规律，揭示了新疆生态耗水的结构特征。主要结论如下：

(1) 1990—2020年间，人工绿洲面积不断侵占天然绿洲，绿洲配比逐步趋于1.5:1。

(2) 新疆绿洲耗水量整体呈增长趋势，其中2010—2018年较1990—1999年和2000—2010年增幅更明显；绿洲耗水呈“北高—南低”的空间分布；人工绿洲和天然绿洲的植被耗水总量波动增长，增幅分别为57.0%和45.8%。

(3) 新疆的植被覆被23.6%显著增长，32.3%显著减小，44.1%未发生显著变化。新疆绿洲生态耗水量为249.1亿 m^3 ，天然湖泊生态耗水量为38.7亿 m^3 ，人工水库、坑塘等水体耗水量为20.2亿 m^3 ，农田防护林耗水量为21.7亿 m^3 。新疆生态耗水总量为329.7亿 m^3 ，占总可利用水量的49.6%，耗水结构基本符合“生态环境和社会经济系统的耗水占比以各50%为宜”的调控原则。

参考文献：

- [1] 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))
- [2] 刘金鹏, 费良军, 南忠仁, 等. 基于生态安全的干旱区绿洲生态需水研究[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 226-232. (LIU J P, FEI L J, NAN Z R, et al. Study on ecological water requirement of the arid area oasis based on the theory of ecological security[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 226-232. (in Chinese))
- [3] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9. (CHEN Y N, YANG Q, LUO Y, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9. (in Chinese))
- [4] 何珍珍, 王宏卫, 杨胜天, 等. 渭干河-库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5473-5482. (HE Z Z, WANG H W, YANG S T, et al. Spatial-temporal differentiation and pattern optimization of landscape ecological security in the Ugan-Kuqa River oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5473-5482. (in Chinese))
- [5] YANG G, LI F D, CHEN D, 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.
- [6] 孙旭伟, 李森, 王亚晖, 等. 1975—2020年疏勒河流域绿洲时空变化研究[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9111-9120. (SUN X W, LI S, WANG Y H, et al. Spatiotemporal change of oasis in Shule River basin during 1975—2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9111-9120. (in Chinese))
- [7] 雷越, 张学斌, 罗君, 等. 基于不同样带的干旱区城市景观格局时空演变特征: 以张掖市为例[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 2034-2048. (LEI Y, ZHANG X B, LUO J, et al. Spatio-temporal evolution of urban landscape pattern in arid areas based on different zones: a case study of Zhangye City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 2034-2048. (in Chinese))
- [8] 王录仓, 高静. 基于灌区尺度的聚落与水土资源空间耦合关系研究: 以张掖绿洲为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1888-1901. (WANG L C, GAO J. Spatial coupling relationship between settlement and land and water resources based on

- irrigation scale—a case study of Zhangye City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(11): 1888–1901. (in Chinese)
- [9] MA W J, MENG L H, WEI F L, et al. Sensitive factors identification and scenario simulation of water demand in the arid agricultural area based on the socio-economic-environment nexus[J]. *Sustainability*, 2020, 12(10): 3996.
- [10] 黄晓荣, 姜健俊, 裴源生, 等. 基于生态保护的宁夏天然绿洲生态需水研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 312–316. (HUANG X R, JIANG J J, PEI Y S, et al. Ecological water demand of Ningxia oasis based on ecological conservancy[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3): 312–316. (in Chinese))
- [11] 付翔永, 杨汉波, 谢艳玲, 等. 叶尔羌河下游河岸林草耗水分析[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(2): 45–55. (FU X Y, YANG H B, XIE Y L, et al. Analysis on water consumption by forest and grass in lower reach of Yarkand River[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(2): 45–55. (in Chinese))
- [12] FEYISA G L, MEILBY H, FENSHOLT R, et al. Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 23–35.
- [13] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005. (DONG X G, DENG M J. *Groundwater Resources in Xinjiang*[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [14] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 519–530. (XU Z X, BAN C G, ZHANG R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 519–530. (in Chinese))
- [15] 徐宗学, 周祖昊, 姜瑶, 等. 西南河流源区径流量变化规律及其未来演变趋势[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 360–374. (XU Z X, ZHOU Z H, JIANG Y, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of Southwestern rivers[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 360–374. (in Chinese))
- [16] 唱彤, 郦建强, 郭旭宁, 等. 江汉平原水域空间格局时空演变特征及其驱动因素分析[J]. *水科学进展*, 2023, 34(1): 21–32. (CHANG T, LI J Q, GUO X N, et al. The spatial-temporal characteristics and driving forces analysis of water area landscape pattern changes on the Jianghan Plain[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1): 21–32. (in Chinese))
- [17] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近17年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 1077–1088. (HUANG J, ZHANG Y, WANG M X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1077–1088. (in Chinese))
- [18] ZHANG J X, WANG S S, HE Y L, et al. Contribution of the precipitation-recycling process to the wetting trend in Xinjiang, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(11): e2021JD036407.
- [19] 王浩, 陈敏建, 何希吾, 等. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究[J]. *中国水利*, 2004(22): 43–45. (WANG H, CHEN M J, HE X W, et al. Study on rational allocation and carrying capacity of water resources in Northwest China[J]. *China Water Resources*, 2004(22): 43–45. (in Chinese))
- [20] 贾宝全, 慈龙骏. 新疆生态用水量的初步估算[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 243–250. (JIA B Q, CI L J. The primary estimation of water demand by the eco environment in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 243–250. (in Chinese))
- [21] 中国工程院“西北水资源”项目组. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(4): 1–26. (Water Resources in Northwest Region Task Group of Chinese Academy of Engineering. Strategic study on allocation of water resources, conservation and upgrading of eco-environment and sustainable development in North-West China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2003, 5(4): 1–26. (in Chinese))
- [22] 中国工程院. 新疆可持续发展中有关水资源的战略研究(综合卷)[R]. 北京: 中国工程院, 2012. (Chinese Academy of Engineering. Strategic research on water resources in sustainable development of Xinjiang (Comprehensive Volume)[R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2012. (in Chinese))
- [23] 龙爱华, 魏潇娜, 张继, 等. 近16年来新疆内陆河区生态耗水及其变化分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(12): 170–177. (LONG A H, WEI X N, ZHANG J, et al. Analysis of ecological water consumption and its variation in inland river regions in Xinjiang in recent 16 years[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(12): 170–177. (in Chinese))
- [24] 吴彬, 杜明亮, 穆振侠, 等. 1956—2016年新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素分析[J]. *水科学进展*, 2021,

- 32(5): 659–669. (WU B, DU M L, MU Z X, et al. Analysis on the variation of groundwater resources and influencing factors in Xinjiang plain area from 1956 to 2016 [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 659–669. (in Chinese))
- [25] YAO J Q, CHEN Y N, ZHAO Y, et al. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124823.
- [26] 邓铭江, 石泉. 内陆干旱区水资源管理调控模式 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(9): 1046–1054. (DENG M J, SHI Q. Management and regulation pattern of water resource in inland arid regions [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(9): 1046–1054. (in Chinese))
- [27] LI M Y, DENG M J, LING H B, et al. Constructing a new irrigation model for desert riparian forests based on response of canopy EVI loss and tree rings growth to groundwater fluctuation [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110060.

Analysis on the change of oasis pattern and ecological water consumption structure in Xinjiang*

LI Mengyi^{1,2}, DENG Mingjiang³, LING Hongbo⁴, DENG Xiaoya⁵, YAN Junjie⁶, JIAO Ayong⁷

- (1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China*; 2. *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*; 3. *Xinjiang Irtys River Basin Development and Construction Management Bureau, Urumqi 830011, China*; 4. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*; 5. *China Institute of Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 6. *Yili Normal University, Yining 835000, China*; 7. *College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract: This study aimed to assess the changes in oasis patterns and the ecological structure of water consumption in Xinjiang, China. Remote sensing information and statistical analysis were applied to study the evolution patterns of Xinjiang's oases and water consumption in the province from the 1990s onward. In doing so, we aimed to reveal the proportional relationship between the socioeconomics and ecology of water consumption. The results showed that the ratio of artificial to natural oases increased from 0.625:1 to 1.3:1. Overall, the consumption of artificial and natural oases showed a fluctuating growth trend: the consumption of artificial and natural oases was 125.0 and 45.8 billion m³, respectively, in 1990, increasing to 18.22 and 7.19 billion m³, respectively, by 2018. Spatially, the consumption of Xinjiang's oasis water was higher in the north and lower in the south. The total ecological water consumption in Xinjiang was 32.97 billion m³. Furthermore, the water consumption of natural ecosystems is was 21.80 billion m³, and the ratios to the total available amount of water amount are were 49.6% and 32.8%, respectively.

Key words: ecological water consumption; third-class water resource regions; oasis pattern; water consumption structure

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52179028) and the Xinjiang Water Conservancy Science and Technology Special Fund Project, China (No. XSKJ-2023-08).