

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.013

阿姆河流域耕地变化及水土匹配特征分析

李文静^{1,2}, 许文强², 包安明², 吕叶^{1,2}

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:基于中亚阿姆河流域4个分区1990—2015年间土地利用变化和水资源等数据,运用耕地变化速率、洛伦兹曲线和基尼系数法以及水土资源匹配系数对阿姆河流域耕地变化和水土匹配状况进行了综合分析。结果表明:1990—2015年阿姆河流域耕地以 $146.74 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度在扩张,且各时期、各分区扩张的速度不同;在不考虑咸海来水不断减少、生态持续恶化的前提下,绿洲区匹配状况属比较公平和相对合理状况;阿姆河流域水土资源空间分布存在明显的错位现象;全流域生态用水被农业用水严重挤占,阿姆河流域灌溉面积、灌溉用水量成为影响咸海水量及面积变化的重要因素,是一种不可持续的用水方式。

关键词:耕地变化;水土资源匹配系数;洛伦兹曲线;基尼系数法;阿姆河流域

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0080-07

Analysis of cultivated land change and water-land matching characteristics in Amu Darya River Basin // LI Wenjing^{1,2}, XU Wenqiang², BAO Anming², LYU Ye^{1,2} (1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the data of land use change and water resources in four zonal of the Amu Darya River basin in Central Asia from 1990 to 2015, and by using the cultivated land change rate, Lorentz curve, Gini coefficient method and land and water resource matching coefficient, we comprehensively analyzed the cultivated land change and water and land resource matching status in the Amu Darya River Basin. The results showed that, from 1990 to 2015, the cultivated land in the Amu Darya Basin expanded at the speed of $146.74 \text{ km}^2/\text{a}$, with different expansion rates in different periods and regions; Regardless of the continuous reduction of the Aral Sea water and the continuous deterioration of the ecology, the matching status of the oasis area is relatively fair and relatively reasonable; There is an obvious dislocation phenomenon in the spatial distribution of water and soil resources in the Amu Darya River Basin; The ecological water in the whole basin is severely squeezed by agricultural water, and the irrigation area and water consumption of the Amu Darya River Basin become the important factors affecting the change of aral sea water volume and area, which was an unsustainable way of using water.

Key words: change of cultivated land; land and water resource matching coefficient; Lorentz curve; Gini coefficient method; Amu Darya River Basin

水资源与耕地资源是保障粮食安全和生态安全的基础,然而水土资源在空间上往往存在分布不均、匹配错位的问题,这在一定程度上影响水土资源的利用效率,成为区域可持续发展的限制性因素^[1-2]。研究水土资源空间匹配状况不仅可以了解其空间分布的差异性,还有利于水土资源的优化配置,并为协

同管理提供依据,从而实现可持续发展目标。

位于中亚干旱、半干旱区的阿姆河,是咸海流域水量最大的河流,但过去几十年间,由于持续干旱和人类活动影响日益加剧,以及苏联解体前后出现的政治经济巨变,阿姆河流域的水土开发及匹配状况随之发生根本性改变,不合理的水土资源利用方式

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA20030101);王宽诚教育基金(GJTD-2020-14);荒漠与绿洲生态国家重点实验室开放课题(G2019-02-03)

作者简介:李文静(1994—),女,硕士研究生,研究方向为区域经济与规划。E-mail: lwenjingjing@163.com

通信作者:许文强(1979—),男,研究员,博士,主要从事干旱区碳循环研究。E-mail: xuwxq@ms.xjb.ac.cn

严重影响了流域可持续发展^[3],并引发了一系列的生态问题,如土壤盐渍化,植被退化,盐尘暴等^[4-5]。水资源过度开发利用的直接结果便是造成湖泊水位下降、下游的三角洲湿地面积减少,最终导致全球关注的咸海危机^[6-7]。此外,阿姆河流域处在“一带一路”建设的重要区域且具有跨界的属性,原本水土资源时空分布不均匀,再加上上下游水资源开发利用极其不平衡,使水资源更加成为限制沿岸国家实现共同发展的重要因素^[8]。因此,在这样的背景下,深入研究阿姆河流域的水土开发状况,开展水土资源匹配状况评价,探讨阿姆河流域水土平衡和咸海可持续发展路径变得尤为紧迫。

目前学者们已基于多种方法对水资源与耕地资源匹配度进行了相关研究,并取得许多成果。总的来看,所运用的研究方法主要包括单位面积水资源量法^[9]、基尼系数法^[10]、DEA 法等^[11],其中单位面积水资源量法的运用最为成熟,涉及的研究范围也较广泛,但是对于阿姆河流域尺度的水资源与耕地匹配程度的研究并不多^[12-13],尤其对于流域而言,不同分区间水土资源匹配程度的研究亟待深入。在已有研究中,Micklin^[14]认为阿姆河流域所在的中亚地区面临的水资源矛盾其实是一种管理上的危机;Sun 等^[15-16]研究表明,先进的灌溉方式如喷灌和滴灌等,可以提高阿姆河流域灌溉效率。对阿姆河流域实施水土资源协同管理,提高绿洲区水资源的利用效率,并合理配置绿洲区农业用水与咸海生态用水,可有效解决流域水资源困境以及实现咸海生态恢复目标。

本文基于阿姆河流域耕地变化和水资源等数据,运用耕地变化速率、洛伦兹曲线和基尼系数法、水土资源匹配系数以及垦殖率分析阿姆河流域不同分区耕地规模与水资源匹配度,探讨流域水土资源空间分布格局,旨在为阿姆河流域水土资源合理配置与优化利用提供参考。

1 研究区概况

阿姆河发源于帕米尔高原的山地冰川,流经卡拉库姆沙漠,最终汇入咸海,是咸海流域水量最为丰沛的河流,也是中亚地区重要的跨界河流,依次流经阿富汗、塔吉克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦。研究区属典型的温带大陆性干旱、半干旱气候,季节温差较大,冬季寒冷,夏季炎热^[17]。流域气候干燥,潜在蒸散强度大,相对湿度低;流域内海拔自西向东逐渐升高,地势落差大,降水分布不均匀,降水量上游高山区可达 500 mm 以上,下游平原绿洲区普遍低于 200 mm,区域水资源总体匮乏^[18-20]。

20 世纪 50—70 年代,苏联在中亚阿姆河流域

建成了大规模的运河和引水灌溉工程,用于其中卡拉库姆运河是阿姆河流域最大的引水工程,总长约 1 300 km,灌溉面积超过 100 万 hm^2 ^[21]。

本文根据阿姆河流域地形地貌、行政区划、阿姆河产耗水特点等,将流域划分为上游区、中游区、下游区和卡拉库姆运河区 4 个分区,如图 1 所示。

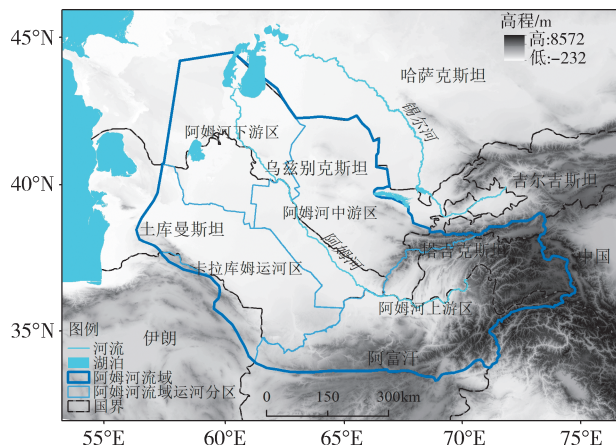


图 1 研究区地理位置及流域分区

Fig. 1 Geographical location of the study area and zoning of the river basin

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 耕地变化分析方法

耕地面积年均变化规模可以从绝对量上反映耕地面积的变化速度。通过将某时段年均变化规模与整个研究期进行比较,可以了解不同时段的变化速度对整个研究期的影响程度,并能够清晰地体现出不同时段之间变化速度的差异^[22]。本文以耕地面积年均变化规模代表变化速度,将相对变化速度用于时序上的比较:

$$S = \frac{Y_a - Y_b}{b - a} \quad (1)$$

$$X = \frac{(Y_b - Y_a)/(b - a)}{(T_B - T_A)/(B - A)} \quad (2)$$

式中: S 为扩张速度, S 值越大,变化速度越大; Y_a 、 Y_b 分别为基准年 a 和目标年 b 的耕地面积,万 hm^2 ; T_A 为研究期初 A 时耕地面积,10⁴ hm^2 ; T_B 为研究期末 B 时耕地面积,10⁴ hm^2 ; X 为相对变化速度,0 < X < 1 时表示该时段变化速度慢于整个研究期的变化速度, $X = 1$ 时表示该时段变化速度与整个研究期一致, $X > 1$ 时表示该时段变化速度快于整个研究时期, $X < 0$ 时表示该时段处于调整或衰退时期。

2.1.2 洛伦兹曲线与基尼系数计算方法

洛伦兹曲线最早用于衡量收入分配的均衡问题,用图形来反映区域人口的经济收入不平均程度。

水资源在空间上的分布同样具有不均衡性,其内涵与收入分配的均衡性问题十分类似^[23],因此,用洛伦兹曲线来表示水资源与耕地资源在阿姆河流域空间分配上的不均衡性同样具有很好的 consistency^[24]。

洛伦兹曲线的缺点在不能进行定量表达。为弥补这一缺点,意大利经济学家提出的基尼系数成为有效定量测算区域水土资源匹配程度的重要指标。参照联合国相关机构总结的收入分配公平性标准^[25]来表示阿姆河流域农业用水量和耕地资源匹配程度,基尼系数 G 所代表的评价结果为: $0 < G < 0.2$ 为绝对公平, $0.2 \leq G < 0.3$ 为比较公平, $0.3 \leq G < 0.4$ 为相对合理, $0.4 \leq G < 0.5$ 为差距较大, $0.5 \leq G < 1$ 差距悬殊。

2.1.3 单位面积耕地拥有的水资源量法

社会经济用水包括工业用水、农业用水、生活用水和其他用水,而农业水资源可利用量则根据社会经济用水中农业用水的比重确定^[26]。本文以 4 个分区作为基本单元,计算农业水资源可利用量与耕地的匹配程度。阿姆河流域水土资源匹配系数计算公式为

$$R_i = W_i \alpha_i / L_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: R_i 为阿姆河流域第 i 个分区水土资源匹配系数; W_i 为第 i 个分区水资源可利用量, 亿 m^3 ; α_i 为第 i 个分区社会经济用水中农业用水的比重; L_i 为第 i 个分区耕地面积, 万 hm^2 ; n 为阿姆河流域选取和划分的区位单元的数量, 本文 $n = 4$ 。

2.1.4 土地垦殖率

土地垦殖率^[27]一般是以某地区的耕地面积在土地总面积中所占比例来衡量, 表示土地被开垦规模和程度, 计算公式为

$$C_k = \frac{L}{C} \times 100\% \quad (4)$$

式中: C_k 为土地垦殖率, %; L 为耕地面积, 万 hm^2 ; C 为土地总面积, 万 hm^2 。

2.2 数据来源

选取了阿姆河流域 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年的 LandsatTM/ETM+ 遥感影像数据, 选取成像时间集中于 7—9 月, 图像清晰, 基本无云雾影响, 且此时段内的农作物生长较好, 可以很好地体现耕地信息。通过使用 ENVI5.3 软件对 4 个时段影像进行几何校正、影像拼接、裁剪等预处理。本研究将阿姆河流域土地利用类型分为滩地、未利用地、建设用地、耕地、林地、草地、灌丛、水域及湿地共 9 类, 借助 eCognition 软件进行面向对象的地类分类, 实现软件自动分类和人工信息提取相结合, 最后对分类结果进行人工检查与修正。解译数据的精度验证主要通过野外实地调查和高分辨率影像对比两种方法

开展, 即通过野外 GPS 采点验证和 GoogleEarth 高分辨率卫星影像对比验证, 数据解译精度达到 87% 以上, 满足研究需要。水资源数据主要参考中亚国家间协调水事委员会科学信息中心 (Scientific Information Center of the Interstate Coordination Water Commission of Central Asia, SIC ICWC)、国际水管理研究所 (International Water Management Institute, IWMI) 以及 CAWATERinfo 中亚水资源信息网 (<http://www.cawater-info.net>)。通过计算公式再利用 ArcGIS10.2 软件采用自然断裂法 (Jenks) 对垦殖率以及水土资源匹配系数进行等级划分。

3 结果与分析

3.1 耕地面积变化时空特征

基于 ArcGIS 软件, 对阿姆河流域不同时段耕地变化进行分析。空间上来说, 阿姆河流域耕地大都沿着河流分布。耕地面积总体呈扩张趋势, 有明显的缩减-扩张-缩减的波动性特征。1990—2000 年耕地减少, 缩减部分主要在边缘地区, 变化程度明显, 主要发生在撒马尔罕绿洲和布哈拉绿洲的边缘以及捷詹绿洲外围; 2000—2010 年绿洲的发展以扩张为主, 主要表现为内部填充和边缘扩张, 变化位置发生在上游山区、阿富汗、伊朗、布哈拉绿洲等地, 阿姆河下游则有部分缩减; 2010—2015 年绿洲再次出现缩减, 变化幅度最大的地方在阿姆河上游区, 尤其以阿富汗最为明显 (图 2)。

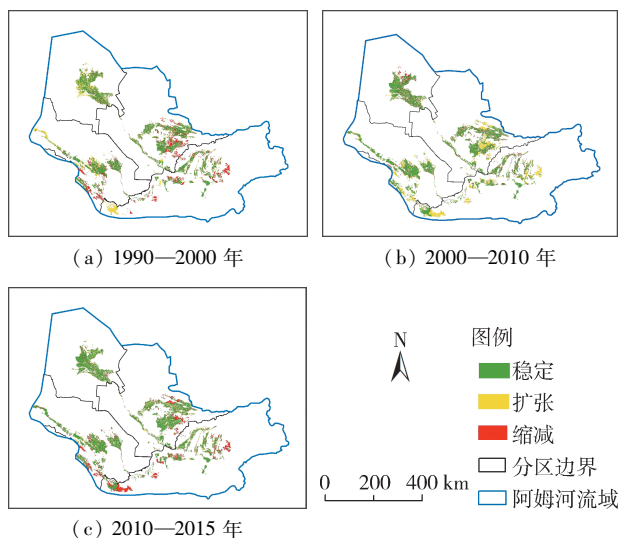


图 2 1990—2015 年阿姆河流域耕地变化

Fig. 2 Change of cultivated land in the Amu Darya River Basin from 1990 to 2015

根据式 (1) (2) 计算出 4 个分区耕地的扩张速度与相对变化速度见表 1, 可以看出各时期、各分区扩张的速度有所不同, 总体耕地面积增加。从扩张速度来看, 阿姆河下游在整个研究时段内扩张速度

表1 1990—2015 年阿姆河各分区耕地扩张速度变化情况

Table 1 The speed change of cultivated-land expansion in the Amu Darya River Basin from 1990 to 2015

时间	扩张速度/($\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)					相对变化速度				
	上游区	中游区	下游区	卡拉库姆运河区	阿姆河流域	上游区	中游区	下游区	卡拉库姆运河区	阿姆河流域
1990—2000 年	-177.37	-350.07	469.09	56.91	-115.25	3.85	8.11	2.66	0.90	-0.79
2000—2010 年	708.29	434.57	-121.53	517.67	1538.99	-14.31	-10.06	-0.69	8.19	10.49
2010—2015 年	-1309.22	-384.92	185.77	-605.39	-2113.76	26.46	8.91	1.05	-9.58	-14.40
1990—2015 年	-49.48	-43.18	176.18	63.22	146.74	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

最大($176.18 \text{ km}^2/\text{a}$),是阿姆河流域整体扩张速度的1.2倍,阿姆河中游地区的变化相较于其他分区在1990—2015年整个研究时段内比较平稳;从相对变化速度来说,1990—2000年各个分区的变化较为平缓,2010—2015年的相对扩张速度较大,各个分区变化差异大。

3.2 耕地与水源的匹配

基于阿姆河流域分区的水土资源数据,运用洛伦兹曲线和基尼系数计算出阿姆河流域1990年、2000年、2010年、2015年水土匹配基尼系数和4年平均水土匹配基尼系数如表2所示。对比阿姆河流域4个时期的洛伦兹曲线(图3)和基尼系数,可以看出2000年洛伦兹曲线更趋向于绝对平均线,基尼系数为0.1356,匹配度最好。主要由于2000年是枯水年,中下游用水量比平水年减少,从而导致中、下游土壤盐渍化加剧,大量耕地弃耕,水量减少的同时耕地也在大幅度减少。1990年、2000年、2010年、2015年4个年份水土资源平均基尼系数为0.2034,处于比较公平状态。因此,基于阿姆河流域农业用水量,从不同时期水土匹配基尼系数来看,阿姆河流域绿洲区并不缺水。尽管1990年以后,阿姆河的流量在减小,耕地面积在不断增加,但这并不代表单位土地面积的水资源量在下降,水土资源分配的不公平性在加剧,原因是大量引水灌溉工程及节水措施提高了用水效率。另外自2001年之后阿姆河的水不再汇入咸海,这就意味着阿姆河的水量虽然在减少,但该流域的用水量并没有减少,地表水资源大部分用于农业生产。

表2 1990—2015 年阿姆河流域水土资源匹配基尼系数及评价结果

Table 2 Gini coefficient and evaluation results of water and land resources matching in the Amu Darya River Basin from 1990 to 2015

时间	基尼系数	评价结果
1990 年	0.2444	比较公平
2000 年	0.1356	绝对公平
2010 年	0.2474	比较公平
2015 年	0.1864	绝对公平
1990—2015 年	0.2034	比较公平

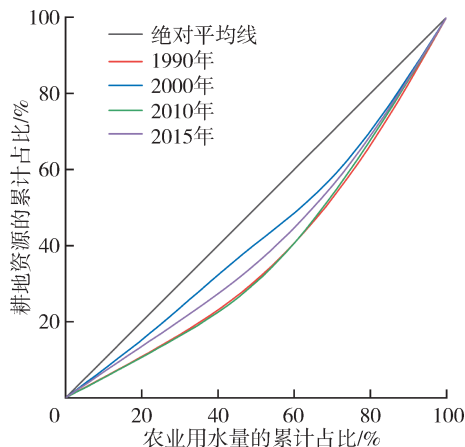


图3 阿姆河流域水资源与耕地匹配的洛伦兹曲线

Fig.3 Lorentz curve of water resources and cultivated land matching in Amu Darya River Basin

3.3 水土资源空间分布格局

由于基尼系数法并不能详细描述其内部结构,即不能对各个分区之间的不匹配程度进行对比描述,且单元的划分可能在一定程度上造成误差^[28-29]。因此,为能够更加直观地看出阿姆河流域水土资源在分区内匹配状况的差异性,采用水土匹配系数和垦殖率对阿姆河流域水土资源匹配状况进行分析。以2015年阿姆河4个分区水资源与耕地统计数据为基础,根据水土资源匹配系数在空间上的分区异质特征,借助ArcGIS软件Jenks功能,即自然断裂点法,将水土资源匹配系数划分为4个等级^[30]:①匹配状况较好($R > 0.6454$);②匹配状况相对合理($0.4366 < R \leq 0.6454$);③匹配状况较差($0.4055 < R \leq 0.4366$);④匹配状况极差($0.0001 < R \leq 0.4055$)。

阿姆河流域垦殖率和水土资源匹配系数在各分区表现出一定的差异性,其中垦殖率由低到高依次为上游(5.14%)、下游(8.48%)、中游(8.96%)、卡拉库姆运河(9.54%),垦殖率最高的卡拉库姆运河地区是垦殖率最低的上游地区的1.86倍;阿姆河流域水土资源匹配系数由低到高依次为下游(0.4055)、卡拉库姆运河(0.4336)、中游(0.6454)、上游(0.93),匹配系数最高的是阿姆河上游地区。把阿姆河流域作为一个整体,该流域垦殖率平均为

8.03, 水土资源匹配系数平均为 0.603 6, 属匹配状况相对合理。

从综合垦殖率与水土资源匹配系数可以看出, 除阿姆河中游区水土资源在空间分布上一致之外, 其他 3 个分区水土资源在空间分布上存在错位现象, 表明阿姆河流域水土资源在分区内空间分布不均匀。从分区差异来看, 阿姆河下游区水土匹配系数最低, 这是由于灌溉农田主要分布在中下游平原区, 且下游耕地以 $176.18 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度在扩张, 使得灌溉用水紧张。为应对水资源危机, 下游三角洲的乌兹别克斯坦卡拉卡尔帕克斯坦自治共和国在阿姆河塔吉三角洲修建了人工湖和水库, 以保障下游的农牧业用水。卡拉库姆运河区的水土匹配系数同样较低, 但原因区别于阿姆河下游区。尽管卡拉库姆运河作为阿姆河流域最大的引水工程, 将阿姆河近 $1/3$ 的水量取走, 但运河流经荒漠、沙地, 中途蒸发、渗漏非常严重, 失水量超过其河流流量的 $1/3$ ^[31]。因此卡拉库姆运河取水量大, 但实际失水量也很严重; 而 4 个分区中水土匹配系数最高的则是阿姆河上游区, 原因是虽然上游水资源条件优越, 但大部分位于山区, 受高山地形限制, 耕地开发难度大, 耕地变化幅度较小, 从而使上游水土匹配系数高而垦殖率较低。值得关注的是, 上游国家为保障其粮食自给, 一直在积极争取扩大灌溉面积, 同时大力利用水资源发电以保障国家发展, 此外, 预计随着今后阿富汗局势稳定并开始发展, 必然增加农业用水量^[32], 所以阿姆河上游区农业用水继续增加的可能性很大, 这可能会导致上游水土资源匹配度下降。

由此可见, 从水土资源匹配状况来说, 为缓解该流域的水资源矛盾, 阿姆河流域在进行水土资源开发时应综合考虑不同分区的社会经济、人口以及自然环境特点, 确定合理的农业用水与生态用水分配方案, 从而实现阿姆河流域水资源的协同管理以及各分区的共同发展。

4 讨论

4.1 农业用水效率

从计算出的阿姆河流域水土资源匹配基尼系数来看, 阿姆河流域水土资源匹配属比较公平状态。但实际处于阿姆河流域的绝大部分国家是典型的农业国, 且多种植棉花、水稻等耗水量极大作物, 消耗约整个农作物用水量的 90%, 人均农耕地的用水量相当于发达国家的 9 倍^[33], 因而从农业用水结构上来看, 阿姆河流域绿洲农业用水占比极大, 且农业用水效率低, 消耗了该区域大部分水量, 所以这是在不考虑咸海来水不断减少、生态持续恶化前提下的

“比较公平”, 表明目前阿姆河流域的水土资源问题主要是各分区以及农业用水与其他用水之间的分配和利用矛盾, 如何优化 4 个分区间的水资源调度, 提高阿姆河流域地区农业用水的利用效率, 是目前面临的主要问题。因此, 为寻求阿姆河流域水土关系的平衡提出以下建议: ①流域内各个国家在保证粮食生产安全的情况下应合理管控耕地的扩张速度, 合理开发水土资源。②阿姆河流域国家应把节水农业作为发展方向, 依靠节水灌溉发展农业, 如改造灌溉系统, 在灌渠内铺设防渗层, 减少田间损失以及灌溉系统内的损失。③相关国家共同商讨, 在现有规定的基础上制定出更加完整严格的水资源管理制度, 以更好地解决各分区水资源匹配不均的问题。

4.2 咸海水面萎缩与流域用水量的关系

结合图 2、4 可以看出, 1990—2015 年阿姆河流域耕地面积总体以 $146.74 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度在扩张, 但咸海水量、水体面积在持续缩减。至 2014 年咸海水体面积只有 1990 年的 31.6%, 而水量仅为 1990 年的 6.58%, 咸海面积减少 68.4%、水量减少 93.4%。2000 年时联合国教科文组织在咸海流域 2025 年预测中指出, 该流域每年需要节约 23 km^3 的水, 才能使咸海的表面积稳定在现在水平^[34]。按照联合国教科文组织预测, 以 2000 年咸海水量为基准 (181 km^3), 至 2014 年咸海流域节约水量为 322 km^3 , 而实际上至 2014 年咸海流域水量仅为 23.3 km^3 ^[35]。这意味着阿姆河流域耕地的不断扩张使得灌溉用水量增长, 随之阿姆河汇入咸海的水量持续减少, 最终导致咸海的水量、水体面积缩减。同时杨雪雯等^[36]研究发现咸海面积与阿姆河流域灌溉面积显著相关, 相关性达 -0.893 , 灌溉用水量成为影响咸海面积变化的重要因素。虽然阿姆河流域农业用水量在 2000 年时出现一个低值, 但由于 2000 年的上游来水量减少所致。

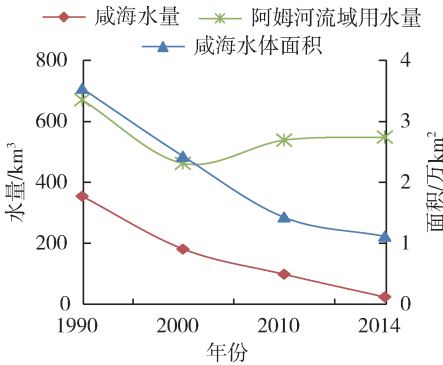


图 4 咸海水体面积、水量变化与流域总用水量
Fig.4 Water area、water volume change in aral sea and total water consumption

综上所述, 阿姆河流域农业用水的充分保障是

以牺牲流域生态用水作为代价的,这是不可持续的用水方式。在这种情况下,为改善该地区的生态状况,必须把农业用水作为阿姆河流域可持续发展的关键变量,促使该流域水土资源的匹配向更加公平、合理的方向转变,最终实现咸海流域水资源、社会经济与生态环境的协调可持续发展。

5 结 论

a. 总体来看,1990—2015 年阿姆河流域耕地在数量和空间上都发生了变化。耕地总体呈扩张趋势,面积的扩展变化有明显的缩减—扩张—缩减的波动性特征,且各时期、各分区扩张的速度不同。

b. 1990—2015 年阿姆河流域水土资源匹配,处于比较公平和相对合理状态。整体上说,阿姆河流域绿洲区并不缺水,但这是在不考虑咸海来水不断减少、生态持续恶化前提下的“比较公平”和“相对合理”。

c. 阿姆河流域水土资源空间分布存在错位现象,上游区农业水土资源匹配度最好,下游区匹配度最差。从水土资源匹配状况来说,阿姆河流域在进行水土资源开发时应综合考虑优化各分区间的水资源调度以及农业用水与生态用水的合理分配,从而实现阿姆河流域水资源的协同管理。

d. 阿姆河流域的生态用水被农业用水严重挤占,咸海面积和水量的减少与阿姆河流域灌溉面积显著相关,灌溉用水量成为影响咸海面积变化的重要因素,这是一种不可持续的用水方式,必须把农业用水作为阿姆河流域可持续发展的关键变量。

参考文献:

[1] 孙侦,贾绍凤,严家宝,等. 中国水土资源本底匹配状况研究[J]. 自然资源学报,2018,33(12):2057-2066. (SUN Zhen, JIA Shaofeng, YAN Jiabao, et al. Study on the matching pattern of water and potential arable land resources in China[J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(12):2057-2066. (in Chinese))

[2] 左其亭,郝林钢,刘建华,等. “一带一路”分区水资源特征及水安全保障体系框架[J]. 水资源保护,2018,34(4):16-21. (ZUO Qiting, HAO Lingang, LIU Jianhua, et al. Characteristics of water resources in “Belt and Road” district and its framework of water security system[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))

[3] 李婧,年雁云,李新. 2000—2009 年中亚阿姆河流域土地覆被时空变化分析[J]. 遥感技术与应用,2017,32(2):218-227. (LI Qiang, NIAN Yanyun, LI xin. The analysis of spatial and temporal change in the Amu Darya

Basin, Central Asia, from 2000 to 2009 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(2):218-227. (in Chinese))

[4] 陈桃,包安明,郭浩,等. 中亚跨境流域生态脆弱性评价及其时空特征分析—以阿姆河流域为例[J]. 自然资源学报,2019,34(12):2643-2657. (CHEN Tao, BAO Anming, GUO Hao, et al. Ecological vulnerability assessment for a transboundary basin in Central Asia and its spatiotemporal characteristics analysis: Taking Amu Darya River Basin as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(12):2643-2657. (in Chinese))

[5] 张喆,丁建丽,王瑾杰. 中亚沙尘气溶胶时空分布特征及潜在扩散特性分析[J]. 地理学报,2017,72(3):507-520. (ZHANG Zhe, DING Jianli, WANG Jinjie. Spatio-temporal variations and potential diffusion characteristics of dust aerosol originating from Central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3): 507-520. (in Chinese))

[6] 邓铭江,龙爱华,李湘权,等. 中亚五国跨界水资源开发利用与合作及其问题分析[J]. 地球科学进展,2010,25(12):1337-1346. (DENG Mingjiang, LONG Aihua, LI Xiangquan, et al. An analysis of the exploitation, cooperation and problems of transboundary water resources in the five Central Asian countries[J]. Advances in Earth Science, 2010,25(12):1337-1346. (in Chinese))

[7] ZHANG J Y, CHEN Y N, LI Z, et al. Study on the utilization efficiency of land and water resources in the Aral Sea Basin, Central Asia[J]. Sustainable Cities and Society, 2019,51:1016-1093.

[8] 郝林钢,左其亭,刘建华,等. “一带一路”中亚区水资源利用与经济社会发展匹配度分析[J]. 水资源保护,2018,34(4):42-48. (HAO lingang, ZUO Qiting, LIU Jianhua, et al. Analysis of matching degree between water resource utilization and economic-social development in Central Asia area of “Belt and Road” [J]. Water Resources Protection. 2018,34(4):42-48. (in Chinese))

[9] 南纪琴,王景雷,秦安振,等. 中国西北旱区农业水土资源利用情景潜力研究[J]. 自然资源学报,2017,32(2):292-300. (NAN Jiqin, WANG Jinglei, QIN Anzhen, et al. Study on utilization potential of agricultural soil and water resources in Northwest Arid Area [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(2):292-300. (in Chinese))

[10] 杨齐祺,杨悉廉,乔传泰,等. 基尼系数视野下的安徽省水土资源匹配分析[J]. 中国农学通报,2016,32(20):72-76. (YANG Qiqi, YANG Xilian, QIAO Chuantaidou, et al. Matching analysis of water and land resources in Anhui Province based on Gini coefficient[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016,32(20):72-76. (in Chinese))

[11] 黄克威,袁鹏,刘刚. 基于 DEA 的四川省水土资源匹配研究[J]. 中国农村水利水电,2015(10):58-61.

- (HUANG Kewei, YUAN Peng, LIU Gang. Research on water and soil resources matching in Sichuan Province based on DEA[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(10):58-61. (in Chinese))
- [12] THEVS N, NURTAZIN S, BECKMANN V, et al. Water consumption of agriculture and natural ecosystems along the Ili River in China and Kazakhstan[J]. Water, 2017, 9(3):207.
- [13] 闫雪, 孟德坤, 陈迪桃, 等. 基于生态系统服务的中亚水土热资源匹配度时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3):794-806. (YAN Xue, MENG Dekun, CHEN Ditao, et al. Spatio-temporal characteristics of the matching degree of water, soil, and heat resources based on ecosystem services in Central Asia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3):794-806. (in Chinese))
- [14] MICKLIN P P. Desiccation of the aral sea: A water management disaster in the Soviet Union[J]. Science. 1988(241):1170-1176.
- [15] SUN J, LI Y P, SUO C, et al. Impacts of irrigation efficiency on agricultural water-land nexus system management under multiple uncertainties—A case study in Amu Darya River basin, Central Asia[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216:76-88.
- [16] ZHANG J Y, CHEN Y N. Assessment of efficiency and potentiality of agricultural resources in Central Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(9):1329-1340.
- [17] 殷刚, 孟现勇, 王浩, 等. 1982—2012 年中亚地区植被时空变化特征及其与气候变化的相关分析[J]. 生态学报, 2017, 37(9):3149-3163. (YIN Gang MENG Xianyong WANG Hao. Spatial-temporal variation of vegetation and its correlation with climate change in Central Asia during the period of 1982-2012[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 37(9):3149-3163. (in Chinese))
- [18] LI Z, CHEN Y N, LI W H, et al. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(24):12345-12356.
- [19] 阮宏威, 于静洁. 1992—2015 年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7):1292-1304. (RUAN Hongwei, YU Jingjie. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7):1292-1304. (in Chinese))
- [20] 王浩, 罗格平, 王伟胜, 等. 基于多源遥感数据的锡尔河中下游农田土壤水分反演[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12):2717-2731. (WANG Hao, LUO Geping, WANG Weisheng, et al. Inversion of soil moisture content in the farmland in middle and lower reaches of Syr Darya River Basin based on multi-source remotely sensed data[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12):2717-2731. (in Chinese))
- [21] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1):222-230. (YAO Junqiang, YANG Qing, MAO Weiyl, et al. Evaluation of the impacts of climate change and human activities on the hydrological environment in Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1):222-230. (in Chinese))
- [22] 许雪爽, 包安明, 常存, 等. 新疆重点城市建设用地扩张与入地配置协调性分析[J]. 经济地理, 2017, 37(10):92-99. (XU Xueshuang, BAO Anming, CHANG Cun, et al. Characteristics of urban built-up expansion and coordination of man-land allocation in the major cities in Xinjiang[J]. Economic Geography, 2017, 37(10):92-99. (in Chinese))
- [23] 宋建. 2011 年与 2016 年新疆水资源配置公平性比较研究[J]. 水资源开发与管理, 2018(8):47-52. (SONG Jian. Comparative study on equity of Xinjiang water resources allocation in 2011 and 2016 [J], Water Resources Development and Management, 2018(8):47-52. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 李贺娟, 李万明. “一带一路”背景下西北干旱地区水资源与经济生产要素匹配关系研究[J]. 节水灌溉, 2016(11):67-70. (LI Hejuan, LI Wanming. Research on the matching relationship between water resources and economic production factors in the arid regions of Northwest China under the background of the “ Belt and Road ” [J]. Water Saving Irrigation, 2016(11):67-70. (in Chinese))
- [26] 徐娜, 张军, 张仁陟. 基于 Malmquist DEA 的甘肃内陆河流域农业水土资源利用效率及匹配特征研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(2):115-122. (XU Na, ZHANG Jun, ZHANG Renzhi. study on utilization efficiency and matching features of agricultural soil and water resources in inland river basin of Gansu Province based on Malmquist DEA[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(2):115-122. (in Chinese))
- [27] 高升, 林晗, 孙会芸, 等. 平潭岛土地利用类型变化及驱动力分析[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2017, 32(2):54-61. (GAO Sheng, LIN Han, SUN Huihui, et al. Analysis on change and driving forces of the usage types of land in Pingtan Island [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 32(2):54-61. (in Chinese))

(下转第 107 页)

- [12] 马晓宇,朱元励,梅琨,等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. 环境科学研究, 2012,25(1):95-102. (MA Xiaoyu, ZHU Yuanli, MEI Kun, et al. Application of SWMM in the simulation of non-point source pollution load in urban residential area[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(1):95-102. (in Chinese))
- [13] 贾海峰,姚海蓉,唐颖,等. 城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例[J]. 水科学进展,2014,25(2):260-267. (JIA Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al. LID-BMPs planning for urban runoff control and case study[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2):260-267. (in Chinese))
- [14] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] MORASI D N, ARNOLD J G, LIEW M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, 50(3):885-900.
- [16] 史常乐,牛兰花,成金海. 水质模型中污染物衰减常数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):91-96. (SHI Changle, NIU Lanhua, CHENG Jinhai. Sensitivity analysis of pollutant decay coefficient in water quality model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4):91-96. (in Chinese))
- [17] 雷沛,张洪,王超,等. 沉积物水界面污染物迁移扩散的研究进展[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1489-1508. (LEI Pei, ZHANG Hong, WANG Chao, et al. Migration and diffusion for pollutants across the sediment-water interface in lakes: a review[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6):1489-1508. (in Chinese))
- [18] 高峰,蔺欢欢,邓红卫. 强降雨条件下非均匀介质污染物运移数值模拟[J]. 环境科学与技术,2017,40(11):59-66. (GAO Feng, LIN Huanhuan, DENG Hongwei. Numerical simulation of contaminant transport in heterogeneous aquifer under heavy rainfall [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(11):59-66. (in Chinese))
- [19] 韩龙喜,颜芬芬. 水体中不可溶沉降型污染物迁移规律研究进展[J]. 水资源保护,2015,31(3):11-15. (HAN Longxi, YAN Fenfen. Advances of migration patterns of unsolvable sedimentation pollutants in water [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):11-15. (in Chinese))

(收稿日期:2020-01-16 编辑:熊水斌)

(上接第 86 页)

- [28] 姚海娇,周宏飞,苏春风. 从水土资源匹配关系看中亚地区水问题[J]. 干旱区研究,2013,30(3):391-395. (YAO Haijiao, ZHOU Hongfei, SU Chunfeng. Water problems based on spatial matching patterns of water and land resources in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3):391-395. (in Chinese))
- [29] 吴宇哲,鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报,2003,17(5):123-125. (WU Yuzhe, Bao Haijun. Regional Gini coefficient and its uses in analyzing to balance between water and soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5):123-125. (in Chinese))
- [30] 谢桂云,张飞云. 新疆农业水土资源时空匹配研究[J]. 中国农村水利水电,2020(6):58-62. (XIE Guiyun ZHANG Feiyun. Research on time and space matching of agricultural water and soil resources in Xinjiang[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6):58-62. (in Chinese))
- [31] 姚俊强,刘志辉,张文娜,等. 土库曼斯坦水资源现状及利用问题[J]. 中国沙漠,2014,34(3):885-892. (YAO Junqiang, LIU Zhihui, ZHANG Wenna, et al. Water resources and utilization in Turkmenistan[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3):885-892. (in Chinese))
- [32] 邓铭江,龙爱华. 咸海流域水文水资源演变与咸海生态危机出路分析[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1363-1375. (DENG Mingjiang, LONG Aihua. Evolution of hydrologic and water resources and ecological crisis in the Aral Sea Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6):1363-1375. (in Chinese))
- [33] 姚海娇,周宏飞. 中亚地区跨界水资源问题研究综述[J]. 资源科学,2014,36(6):1175-1182. (YAO Haijiao, ZHOU Hongfei, A Review of transboundary water resources in Central Asia[J]. Resources Science, 2014, 36(6):1175-1182. (in Chinese))
- [34] UNESCO. Water related vision for the Aral Sea basin for the year 2025[R]. Paris:UNESCO,2000.
- [35] DENG H J, CHEN Y N. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2017, 544:46-57.
- [36] 杨雪雯,王宁练,陈安安,等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):681-692. (YANG Xuewen, WANG Ninglian, CHEN Anan, et al. The relationship between human activities, climate change and area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):681-692. (in Chinese))

(收稿日期:2020-06-24 编辑:彭桃英)