

第六章 黑河流域耕地利用变化对用水效率的影响

干旱半干旱地区目前和未来面临的水和粮食短缺问题较之其他地区更严重 (Millennium, 2005), 这些生态脆弱地区的农业用水效率研究对维持区域可持续发展至关重要却未得到相应重视。黑河流域是位于中国干旱半干旱地区的重要粮食基地, 水短缺、降水少, 农业生产主要依赖于灌溉, 农业用水占流域总耗水量的 85% 以上 (Deng et al., 2016; Liu et al., 2017)。在耕地扩张、作物种植结构变化的影响下, 农业用水量仍在持续增加, 导致地下水位下降、下游河道断流、生态系统退化等负面影响。然而, 目前仍缺乏对该重要流域的农业用水效率研究, 农业生态系统管理的科学性无法保证。因此, 本研究基于农作物时空分布、时序 NDVI 和多种气象数据, 估算 2007 年和 2012 年黑河流域农作物时空产量和时空耗水量, 从栅格、作物类型和流域等多视角分析农业用水效率的时空变化特征及其原因, 并提出提高农业用水效率、增强农业生态系统可持续性的政策建议。

第一节 农作物耗水量和用水效率研究方法

一、农作物耗水量计算

在干旱半干旱的黑河流域, 农业生态系统主要为灌溉农业, 农作物耗水量 (CWC) 包括有效降水 (ER) 和灌溉 (CI) 两部分。降水中只有一部分被作物有效利用, 其余部分通过径流和下渗流失; 被农作物利用的这部分降水称为有效降水, 可根据美国农业部土壤保护局 (United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, USDA-SCS) 的方法求得 (Liu et al., 2017)。

$$CWC = ER + CI \tag{6-1}$$

$$ER_{\text{month}} = \begin{cases} AR_{\text{month}} \times (125 - 0.2 \times AR_{\text{month}}) / 125 & AR_{\text{month}} \leq 250\text{mm} \\ 125 + 0.1 \times AR_{\text{month}} & AR_{\text{month}} > 250\text{mm} \end{cases} \tag{6-2}$$

式中, ER_{month} 和 AR_{month} 分别是每月的有效降水和实际降水。

二、水利用效率模型

本研究作物用水效率 (WUE) 被定义为单位作物耗水量 (CWC) 生产的作物产量 (Yield) (Mo et al., 2009)。

$$WUE = \frac{Yield}{CWC} \tag{6-3}$$

第二节 农作物耗水量及水利用效率的时空变化规律及原因

一、农作物耗水量时空变化规律

2007—2012 年,黑河流域降水减少,导致农业生态系统的有效降水量(ER)由 203.81mm 减至 154.33mm(图 6-1a)。高海拔的祁连和肃南的 ER 降幅最大,达 60mm 以上。中游大部分地区的 ER 介于 50~60mm。下游额济纳的降水稀少,其 ER 降幅最低,少于 20mm。玉米、小麦、大麦、油菜和其他作物的 ER 分别减少 43.50mm、22.79mm、36.62mm、48.53mm 和 51.17mm(表 6-1)。

由于 2007—2012 年黑河流域降水减少、气温增加,平均作物灌溉量(CI)由 513.92mm 增至 561.80mm(图 6-1b)。大部分的 CI 增加区的增幅介于 50~300mm, CI 增幅大于 300mm 的地区主要位于甘州和临泽。耕地开荒区、大麦向小麦转移区的 NPP 明显增加。高台的 CI 下降最多,部分地区降幅大于 300mm;甘州城市扩张区、下游额济纳、民乐和山丹交界处的 CI 也明显下降。玉米和其他作物的 CI 分别增加 139.14mm 和 18.57mm,小麦、油菜和大麦的 CI 分别减少 72.99mm、10.18mm 和 4.01mm(表 6-1)。

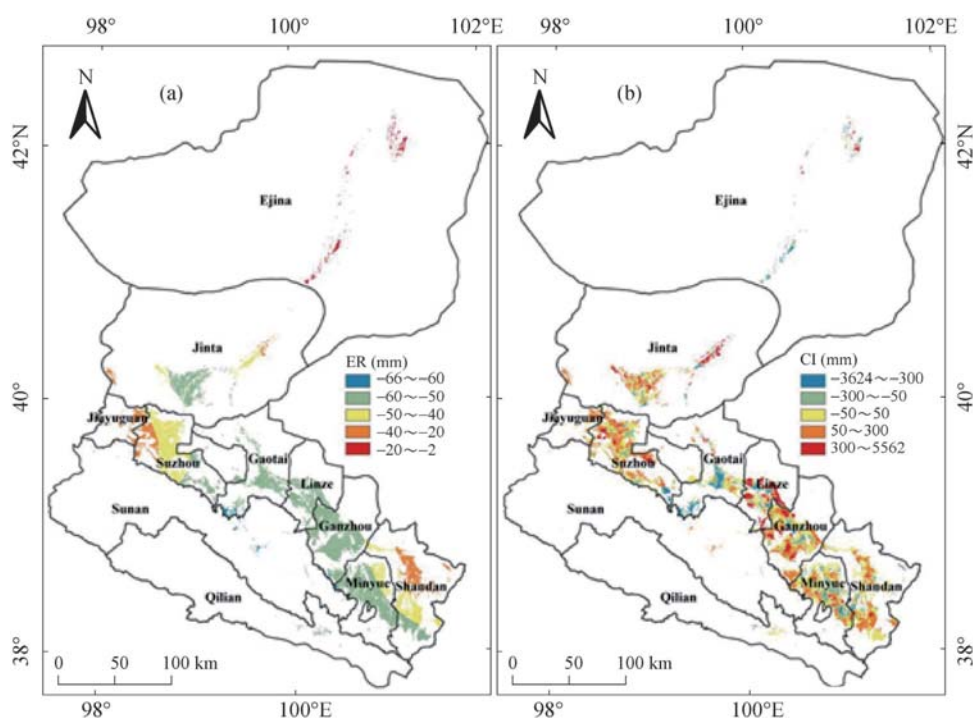


图 6-1 2007—2012 年黑河流域农作物有效降水(a)和灌溉量(b)的空间格局变化

表 6-1 黑河流域 2007 年和 2012 年农作物耗水量 (mm)

作物类型	2007 年			2012 年		
	ER	CI	CWC	ER	CI	CWC
玉米	183.83	666.75	850.58	140.33	805.89	946.22
小麦	229.78	390.13	619.91	206.99	317.14	524.13
大麦	250.20	287.39	537.59	213.58	283.38	496.96
油菜	262.08	306.87	568.95	213.55	296.69	510.24
其他作物	202.04	505.50	707.54	150.87	524.07	674.94

由于 CI 占 CWC 的 70% 以上(表 6-1),2007—2012 年黑河流域的 CWC 呈现出由 CI 主导的空间分异(图 6-2)。中游的甘州、临泽和下游的额济纳的部分区域的 CWC 超过 2000mm(图 6-2a,b,c),CI 高值区也主要分布在这些区域。较之 2007 年,2012 年甘州和临泽高值区的 CWC 持续增加,高台和额济纳高值区的 CWC 减少(图 6-2d)。CWC 大于 1000mm 的地区主要分布于中游的平原绿洲区。CWC 介于 500~1000mm 的大部分区域的 CWC 增加。CWC 小于 500mm 的地区主要位于民乐、山丹、甘州中部和金塔,大部分这些区域的 CWC 呈下降趋势。

黑河流域玉米的 CWC 最大,大麦的 CWC 最小(表 6-1)。2007—2012 年,玉米的 CWC 增加 11.24%(95.64mm),小麦、油菜、大麦和其他作物的 CWC 分别减少 15.45%(95.78mm)、10.32%(58.71mm)、7.56%(40.63mm)和 4.61%(32.60mm)。在 ER 减少、CI 增加的影响下,黑河流域的平均 CWC 由 2007 年的 717.73mm 小幅减少至 2012 年的 716.13mm,减少 0.22%。

二、水利用效率的时空变化规律

2007—2012 年,黑河流域 WUE 高值区主要位于耗水量较少的地区,WUE 低值区主要位于耗水量较多的地区(图 6-3)。WUE 高于 1500g/m³ 的高值区主要零星分布于玉米种植区域(图 6-3a,b,c)。WUE 低于 200g/m³ 的低值区也主要分布在耗水量高的玉米种植区。额济纳由于耗水量较高,其 WUE 一直较低。民乐和山丹的小麦、大麦和油菜种植区域的 WUE 主要介于 500~1500g/m³,并呈增加趋势,部分区域增幅大于 500g/m³。耗水量激增地区的 WUE 呈下降趋势。耕地扩张区的 WUE 增加,城市扩张区的 WUE 下降。

尽管黑河流域玉米的耗水量较高,但其产量差不多是其他几种作物的 2 倍。因此,玉米的 WUE 最大(表 6-2)。2007—2012 年,玉米的 WUE 减少 10.68%(78.58g/m³)。小麦和油菜的 WUE 增幅较大,分别为 21.13%(106.54g/m³)和 21.44%(81.54g/m³)。大麦和其他作物的 WUE 分别增加 4.96%(27.12g/m³)和 6.02%(30.22g/m³)。主要农作物的 WUE 变化导致黑河流域农业生态系统平均 WUE 由 547.94g/m³ 增至 567.84g/m³,增加了 3.36%(19.90g/m³)。

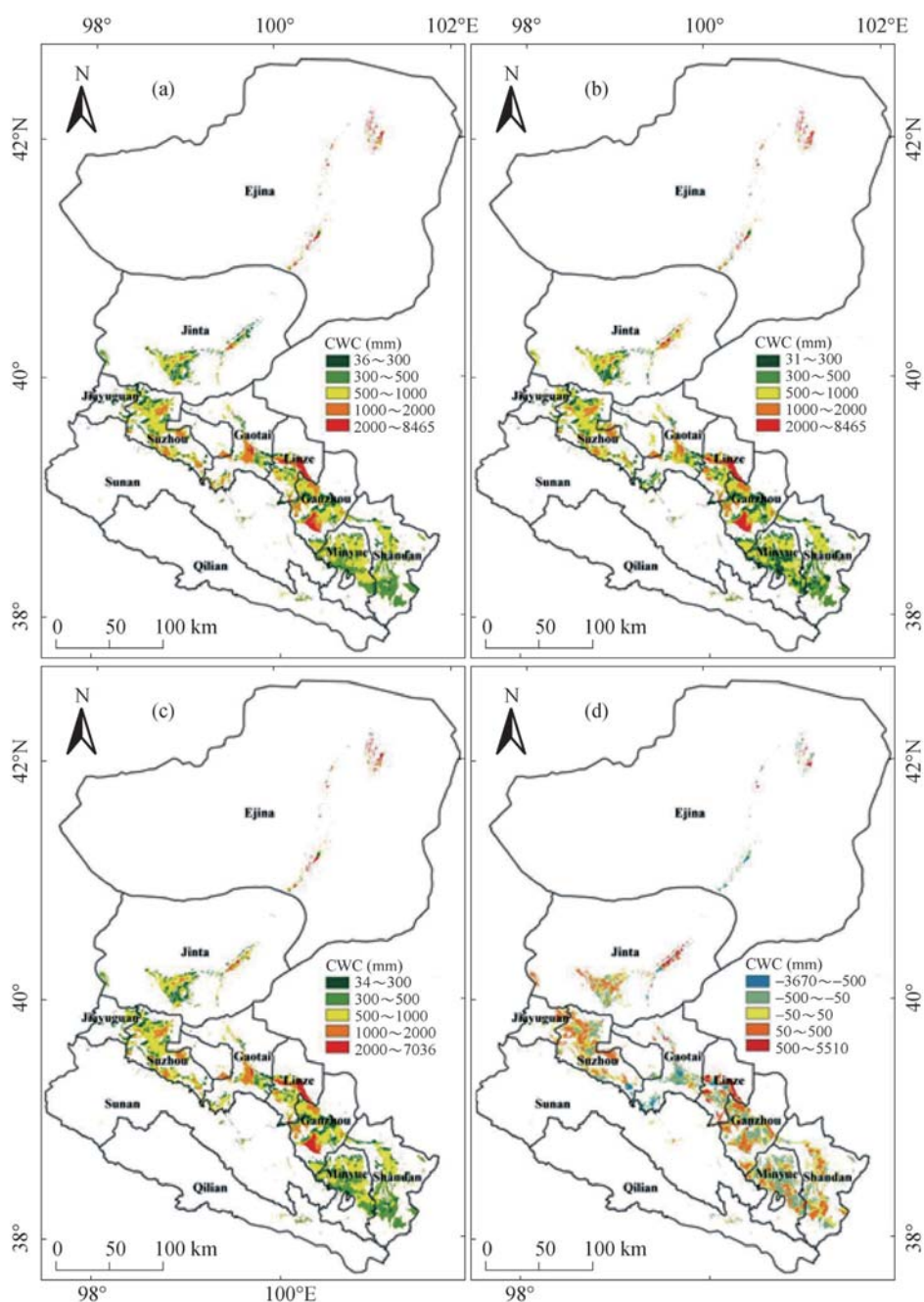


图 6-2 黑河流域农作物耗水量的时空格局

(a)2007 年作物耗水量;(b)2012 年作物耗水量;

(c)2007—2012 年平均作物耗水量;(d)2007—2012 年作物耗水量变化

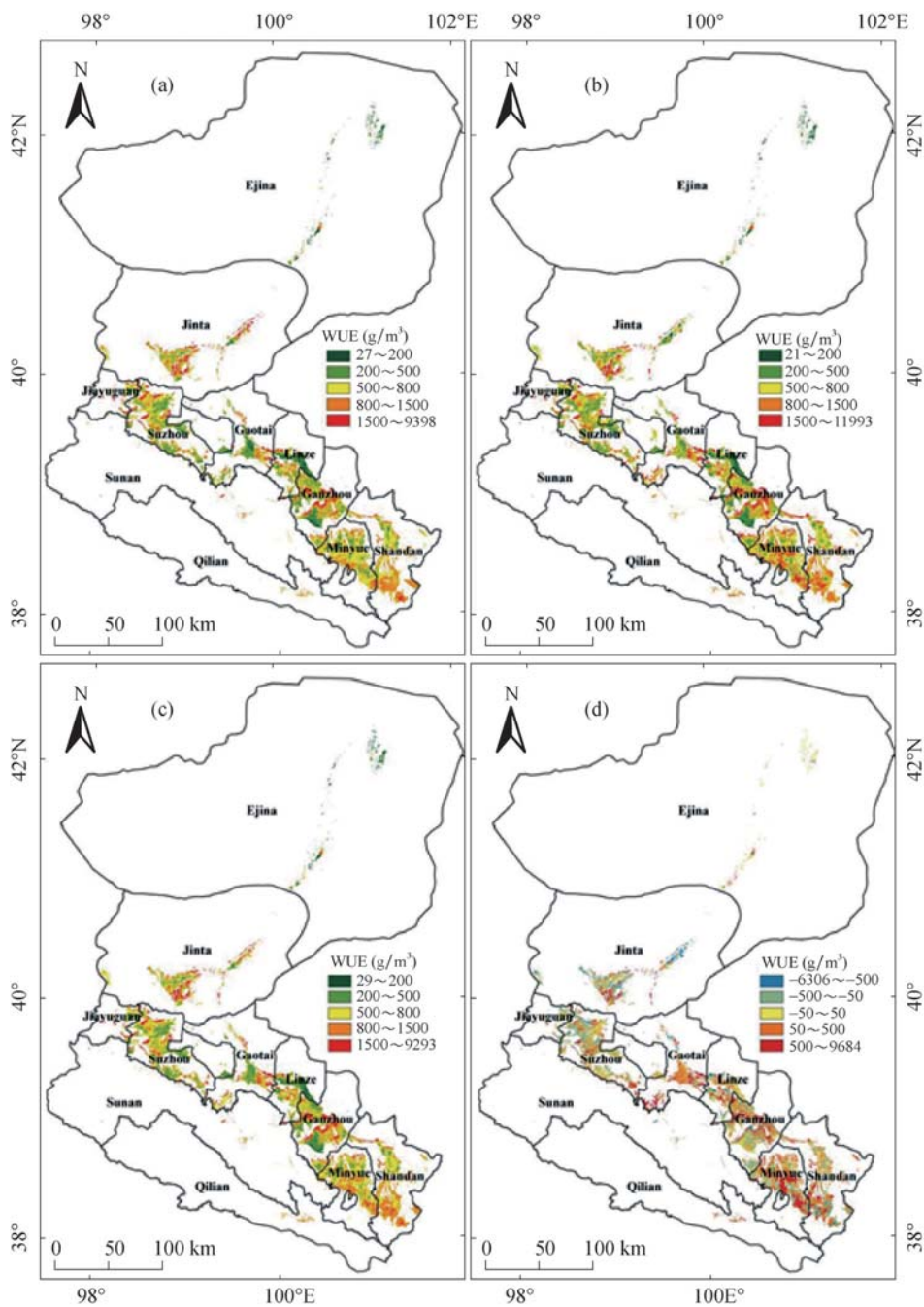


图 6-3 黑河流域农作物用水效率的时空格局

(a)2007 年农作物用水效率;(b)2012 年农作物用水效率;

(c)2007—2012 年平均农作物用水效率;(d)2007—2012 年农作物用水效率变化

表 6-2 黑河流域 2007 年和 2012 年农作物平均用水效率(g/m^3)

作物类型	2007 年	2012 年
玉米	736.10	657.52
小麦	504.24	610.78
大麦	546.41	573.53
油菜	380.32	461.86
其他作物	502.27	532.49

三、水利用效率空间异质性及其变化的原因

农业生态系统的用水效率随作物类型和生长环境而呈现时空分异。黑河流域玉米主要分布在中下游的平原绿洲区(甘州、临泽、高台、肃州和金塔),小麦、大麦和油菜主要分布于中游山区(民乐和山丹)(Liu et al., 2017)。由于 C4 作物玉米具有更高的光合利用率和碳向生物转化能力,其平均产量高于其他主要作物(Collatz et al., 1992)。此外,黑河干流流经平原绿洲区,为这里提供充足的地表水,而且这里海拔更低,更容易建设机井并获取地下水(Liu et al., 2017)。而且平原绿洲区的温度较之山区更高。平原绿洲区更充足的灌溉水资源和更大的积温,为作物生物质积累提供了更适宜的生长环境。因此,黑河流域的作物产量呈现出平原绿洲区高、山区低的空间分异。然而,高产量并非意味着高用水效率,耗水量是决定用水效率的另一个重要因子。根据以往研究、我们的实地调研和模拟结果,平原绿洲区的作物耗水量远大于山区(Liu et al., 2017; Zeng et al., 2016)。一方面,这是由于平原绿洲区主要种植的玉米的耗水量高于山区主要种植的小麦、大麦和油菜。更重要的另一个方面,由于灌溉成本较低和监管不足,农民为了追求更高的经济效益,对于同一种作物,在可利用水资源更多的平原绿洲区,会消耗较之山区更多的水资源。的确,作物耗水量很大程度上影响着产量,但耗水量超过作物实际需水时,继续增加耗水量对产量的提升很少。然而,黑河流域实际作物耗水量远大于作物需水量,尤其在平原绿洲区(Liu et al., 2017)。因此,黑河流域农业生态系统耗水量过多的地区用水效率低,耗水量少但基本满足作物需求的地区用水效率高。对于同一种作物,黑河流域山区的用水效率往往高于平原绿洲区。

用水效率的异质性随种植结构调整和气候波动而变化。2007—2012 年,黑河流域玉米和油菜面积增加,小麦和大麦面积减少(Liu et al., 2017)。玉米用水效率较之其他作物更高,因此玉米扩张区的用水效率增加。受经济利益和政策引导的影响,黑河流域玉米种植中的制种玉米(单价更高)比例不断增加,尤其在甘州、临泽和高台(Liu et al., 2016)。然而,较之大田玉米,制种玉米的产量更低、耗水量更高(Tan 和 Zheng, 2017)。此外,2007—2012 年黑河流域气温升高、降水减少的气候波动导致农作物需水量增加。因此,黑河流域玉米平均用水效率减少。由于玉米种植

的经济效益大于小麦、大麦和油菜,农民会优先保障玉米的耗水。受可利用农业用水总量约束,玉米总耗水增加必然导致小麦、大麦、油菜和其他作物可利用水总量下降。尽管耗水量已经减少,这些作物的耗水量仍远大于需水量,因此这并未威胁到它们的产量,小麦、油菜和其他作物的产量反而增加。因此,小麦、大麦、油菜和其他作物的用水效率增加。

第三节 农业节水潜力及提高用水效率建议

由于各农作物实际耗水量远大于需水量,2007 年和 2012 年黑河流域作物耗水量的 32.58%和 30.13%被浪费(表 6-3)。基于以往的作物需水研究(Liu et al., 2017),理论上,黑河流域 2007 年和 2012 年可分别节约农业用水 $1619.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $1564.33 \times 10^6 \text{ m}^3$,分别占各年总耗水量的 32.52%和 30.06%(表 6-3)。按照作物实际需水进行灌溉,即使不提高作物产量,2007 年和 2012 年黑河流域农业生态系统的 WUE 可在原有基础上分别提高 48.33%(264.83 g/m^3)和 43.12%(244.83 g/m^3),其中玉米 WUE 可分别提高 71.80%(528.49 g/m^3)和 81.44%(535.51 g/m^3)。

表 6-3 黑河流域 2007 年和 2012 年农作物需水量(CWR)、耗水量(CWC)、种植面积(PA)和水浪费(CWW)

作物类型	CWR(mm)		CWC(mm)		PA(10^3 hm^2)		CWW(10^6 m^3)	
	2007	2012	2007	2012	2007	2012	2007	2012
玉米	495.11	521.50	850.58	946.22	118.21	149.52	420.20	635.04
小麦	418.94	411.39	619.91	524.13	45.92	33.68	92.29	37.97
大麦	377.89	393.53	537.59	496.96	23.51	15.43	37.55	15.96
油菜	394.26	417.03	568.95	510.24	16.37	20.02	28.60	18.66
其他作物	495.32	506.58	707.54	674.94	490.34	508.85	1040.60	856.70

注:CWR 和 PA 数据来源于 Liu 等(2017)。

黑河流域玉米的用水效率远大于小麦、大麦、油菜和其他作物。2007—2012 年,其他几种作物向玉米的转移促进了农业生态系统平均用水效率的小幅提升。然而,玉米自身的用水效率却因其耗水量激增而大幅降低。显然这种扩大玉米种植面积来提升流域用水效率是不可持续的。此外,玉米耗水量远大于其他几种作物,其快速扩张导致的农业用水激增,将挤压生态和生活用水空间,不利于流域生态系统和社会经济的可持续发展(Liu et al., 2017)。因此,为了保障流域粮食、水和生态安全,遏制玉米和耕地扩张、调整种植节水作物(Liu et al., 2016, 2017)是合理提升黑河流域用水效率的重要前提。

根据作物在不同生长期的实际需水来制定科学的灌溉制度,可很大程度上节约农业用水、提高用水效率、促进流域可持续性(Liu 和 Shen, 2018; Liu et al., 2017)。

如何使科学灌溉制度在农业生产中得到严格执行是关键和难点。经济效益是农民的首要关切,因此通过节水来实现收益增加有助于用水效率提升。增加农业用水成本被证实是促进合理灌溉和节约农业用水的有效措施(Zhou et al., 2015)。提升农民对用水效率的认识、健全灌溉用水计量和监管也是增加农民节水意愿的重要措施(Deng et al., 2016)。此外,在减少农业用水浪费的基础上,基于作物生产潜力相关理论,通过改良作物品种、完善栽培技术和田间管理等措施增加作物产量、减少作物产量差(Lu 和 Fan, 2013),将进一步提升农业生态系统用水效率。