DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.02.15

绿洲发展生态价值与社会经济价值的综合分析

史艳萍[1], 佟 玲[2], 马黎华[1]
(1.西南大学 资源环境学院, 重庆 北碚 400715; 2.中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘 要:干旱绿洲区水资源匮乏,绿洲的生态发展与社会经济发展之间矛盾突出,评估绿洲生态与经济的价值对于指导绿洲发展具有现实意义。基于2014-2018年的石羊河流域统计数据,考虑流域水资源因素、社会经济因素和绿洲景观因素的影响,结合情景假设的分析方法,分别对流域内绿洲适宜面积、耕地数量底线、绿洲生态价值和社会经济价值进行估算。结果表明:2014-2018年石羊河流域平均绿洲适宜面积为33.09×10^4~50.26×10^4 hm^2,流域平均绿洲生态价值为170.77×10^8元,二者均呈现减少趋势;绿洲生态价值的最小值为假设畜牧业增加情景中的149.44×10^8元,绿洲生态价值和社会经济价值之和最大值为假设增加人口、增加耕地面积、增加畜牧业和增加工业组合下的945.85×10^8元。

关键词:适宜绿洲面积;耕地底线;生态价值;社会经济价值;石羊河流域
中图分类号:TV213.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-643X(2021)02-0103-06

Comprehensive analysis of ecological and socio-economic benefits of oasis development

SHI Yanping[1], TONG Ling[2], MA Lihua[1]
(1. *College of Resources and Environment*, *Southwest University*, *Chongqing* 400715, *China*; 2. *College of Water Resources & Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The water scarcity in arid inland oases results in prominent conflicts between ecological development and socio-economic development. Based on the data from 2014 to 2018, the scenario hypothesis analysis is used to estimate the suitable area of oasis, baseline of cultivated land, ecological and socio-economic value of oasis in Shiyanghe River Basin under the impact of water resources, social economy and oasis landscape in this area. Our results indicate that the average suitable area of oasis ranged from 330.9×10^3 hm^2 to 502.6×10^3 hm^2 and the average ecological value of oasis was approximately 17.08×10^9 CNY in the Shiyanghe River Basin during 2014-2018, and both of them showed a decreasing trend. The minimum ecological value of oasis was estimated as 14.944×10^9 CNY, which was calculated based on the hypothetical increase of animal husbandry. Furthermore, the maximum ecological and socio-economic value of oasis was estimated to be 94.585×10^9 CNY, which was calculated based on the combined hypothetical increase of population, cultivated land area, animal husbandry and industry.

Key words: suitable area of oasis; baseline of cultivated land; ecological value; socio-economic value; Shiyanghe River Basin

1 研究背景

中国绿洲历史悠久[1],水资源开发利用程度高,绿洲社会经济的发展与绿洲生态环境之间矛盾突出。以石羊河流域为例,全区域面积仅有5%为绿洲,却养育了区域内90%的人口,支撑着地区95%的经济发展[2]。中国绿洲景观类型包括耕地、林地、人工草地及改良草地、城镇、村庄等,以人工绿洲为主。绿洲景观类型及其分布变化深刻影响着绿洲地表辐射、水气交换等物质与能量循环过程,从而

收稿日期:2021-01-26; **修回日期**:2021-03-07
基金项目:国家自然科学基金项目(51509214)
作者简介:史艳萍(1999-),女,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事水资源利用与管理等研究。
通讯作者:马黎华(1983-),女,河南鄢陵人,博士,讲师,主要从事水文及相关的数据模拟研究。

影响区域生态环境的可持续发展,甚至对全球范围内的生态环境产生重大影响[3]。1972－2017 年,渭干河－库车河绿洲的林地、草地、盐碱地和水域不断减少,造成下游绿色长廊消失[4]。景观类型及其比例是绿洲生态效益的最直接体现,适宜的景观类型比例在有限的绿洲面积上可以实现最大的生态价值,基于绿洲生态价值与经济价值的综合分析对于平衡绿洲社会经济发展与维持绿洲生态安全方面有重要的现实意义。

绿洲的演变由人类活动与气候变化共同决定,同时,水资源状况对于绿洲发展至关重要[5]。在全球变暖背景下,气温的升高增加了冰山融水,补充了地表径流,但人类活动增加了灌溉分流和用水消耗,导致绿洲水资源的补给量仍呈减少趋势。由于农业灌溉活动的影响,下垫面对气候条件的影响主要发生在夏季,而在冬季影响大不。在针对黑河[6]、阿勒泰地区[7]和叶尔羌河绿洲气候变化[8]特征分析中发现,这些绿洲区域降水增加,气温升高,但不同季节降水存在变化不一致的情况。气候条件也同样影响着下垫面状况的改变。Schlesinger 等[9]研究表明,在绿洲荒漠化的过程中,由于人类活动与气候变化的共同影响导致了区域水文循环的重大改变,最终造成绿洲植被分布和土地利用格局的改变。Pankov 等[10]研究表明,当绿洲扩大时,一些地区会出现盐渍化和风蚀过程加剧的现象。当区域的水资源开采量超过一定阈值时,就会造成区域地表天然植被的枯萎甚至死亡[11]。

石羊河流域开发较早,水资源利用较高,区域内存在水资源严重超采、地下水水质严重恶化、地表植被退化和土壤盐渍化等一系列生态环境问题。本研究充分考虑区域水资源变化因素、社会经济发展因素和绿洲景观类型面积变化因素,在区域统计数据收集的基础上,采用情景假设分析的方法,对绿洲适宜面积、耕地安全底线面积以及石羊河流域生态价值和社会经济价值等进行估算。其结果可以加深对绿洲发展过程的认识,为保障绿洲人民生活和生存权益提供科学依据和数据支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

石羊河流域位于河西地区东部(100°57′～104°12′ N, 37°02′～39°17′ E),是甘肃省河西走廊三大内陆河流域之一,东临乌鞘岭,南接祁连山北麓,北部与巴丹吉林、腾格里沙漠相邻,流域总面积 40 687 km^2。石羊河流域属大陆性温带干旱气候,区域内蒸发强烈降雨稀少,多年平均蒸发量和多年平均降雨量分别为 1 050.42 和 163.2 mm(1951－1997 年),年日照时数为 28 946 h,日照率为 67%,多年平均气温为 7.7 ℃,流域水资源总量为 16.59×10^8 m^3。石羊河流域主要行政区由武威与金昌两市组成,武威市以农业为主,金昌市是我国主要的有色金属生产基地。截止到 2018 年,流域总人口为 219.73×10^4 人,城镇人口有 105.17×10^4 人,地区生产总值为 696.05×10^8 元,其中农业产值为 132.43×10^8 元。耕地面积 51.9×10^4 hm^2,农田有效灌溉面积 29.7×10^4 hm^2,农田实灌面积 25.9×10^4 hm^2,林草实灌面积 3.28×10^4 hm^2;粮食总产量 149.87×10^4 t。

2.2 数据来源

数据主要来源于《石羊河流域水资源公报》[12]和《甘肃省水资源公报》[13](2014－2018 年)。

2.3 研究方法

本研究将绿洲演化归为气候变化和人类活动的共同影响,在气候变化的影响中主要考虑流域降雨量、蒸发量和对应流域可利用水资源量等因素。由于石羊河流域为人工绿洲,人类活动主要考虑下垫面条件改变和社会经济的影响。其中,下垫面条件的改变主要是绿洲景观类型因素的变化,包括耕地、林地、草地、水域和未利用地的土地利用类型面积的变化;关于绿洲社会经济的影响主要考虑人口、各产业产值、粮食产量和用水量等因素的发展。在各个指标的基础上计算适宜绿洲面积和适宜耕地面积,并结合流域的情景假设分析分别得到绿洲的生态价值和社会经济价值,在此基础上进行干旱区石羊河流域生态价值和经济价值的综合评价分析。技术流程如图 1 所示。

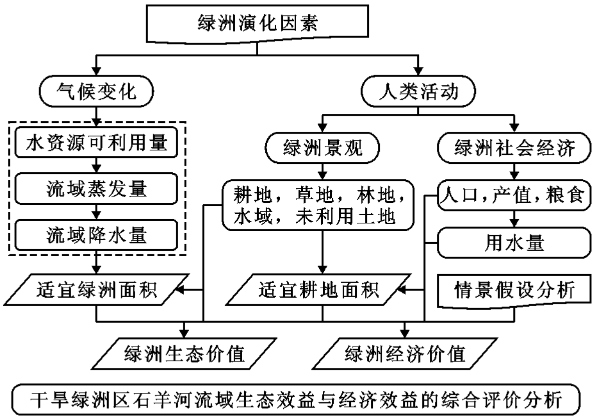

图 1 绿洲生态效益与经济效益综合评价分析技术流程

2.3.1　绿洲适宜面积估算　确定适宜的绿洲面积有利于对绿洲进行维护,控制其影响因素的范围。根据水热平衡理论,适宜的绿洲面积计算方法如公式(1)所示[14]:

$$A = \frac{W - W'}{(ET_0 - P)K_P \cdot H_0} \times 10^3 \qquad (1)$$

式中:A 为适宜的绿洲面积,10^4 hm^2; W 为水资源可利用量,10^8 m^3; W' 为年均工业和人畜用水量,10^8 m^3; ET_0 为流域多年平均蒸发蒸腾量,mm; P 为年均降水量,mm; K_p 为植被综合影响系数,可以参照不同植被的作物系数加权平均,在黑河流域的研究中[15],草地、林地和耕地 K_p 的选取值分别为 0.44、0.70 和 0.90。H_0 为判断绿洲规模适应性的指标,H_0 =0.50 时,代表绿洲处于临界稳定状态;H_0 = 0.75 时,代表绿洲处于稳定状态,因此,适宜的绿洲规模面积区间是将 H_0 分别赋值为0.50和0.75时计算得到的[14]。

2.3.2　耕地安全底线估算　在石羊河流域,超过90%的用水用于耕地灌溉[16],妥善处理好生态用水和农业用水的关系对于维持绿洲生态健康意义重大。在早期(1990 年)绿洲适宜耕地的研究中,绿洲适宜耕地面积是由耗水量的比例决定的,一般认为:耕地面积的年耗水量为绿洲年耗水量的 60% 时,可以保证生态系统的平衡[17];在针对绿洲生态用水和绿洲的水资源合理配置中,认为应该将 30% ~40% 的水资源配置给生态用水[18]。因此考虑耕地数量安全底线对于指导绿洲发展意义重大,本文采用最低的粮食自给标准来进行石羊河流域的耕地数量安全底线计算,计算公式如下[19]:

$$S = \beta \frac{N \cdot G}{P \cdot Q \cdot K} \qquad (2)$$

式中:S 为耕地数量安全底线,hm^2; β 为粮食自给率,%; N 为人口数量; G 为人均粮食需求量,kg; P 为粮食单产量,kg/hm^2; Q 为粮食作物占总播种面积之比,%; K 为粮食复种指数。根据《国家粮食安全中长期规划纲要(2008 -2020 年)》,我国居民的粮食自给率为95%,人均粮食需求量为 400 kg [20],粮食复种指数约为 1.1,粮食单产量 (P) 与粮食作物占总播种面积之比(Q) 分别为约 7 550 kg/hm^2 和 66%。

2.3.3　绿洲生态服务价值估算　随着对生态系统服务价值研究的不断深入,谢高地等[21]综合了文献调查的方法,在我国土地利用类型划分的基础上,制定了更加符合我国国情的陆地生态系统在单位面积上的生态服务价值表,针对不同土地利用类型的不同生态系统服务功能进行生态服务价值赋值,本研究采用的不同土地利用类型下的不同生态服务价值系数来源于此。基于石羊河流域土地利用类型的分类结果,并根据生态质量指数进行赋值[21]。通过进行不同土地对生态环境的具体作用的生态服务价值统计,可以直观地看出各土地利用类型的各个功能所发挥的价值。土地生态服务价值赋值评价如公式(3)、(4)所示[22]:

$$ESV = \sum (A_k \cdot VC_k) \qquad (3)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \cdot VC_{fk}) \qquad (4)$$

式中:ESV 为区域的年生态系统服务总价值,元; A_k 为研究区域第 k 种土地利用类型面积,hm^2; VC_k 为土地利用类型 k 单位面积上的年生态系统服务价值,元/hm^2; ESV_f 为区域的生态系统第 f 项年服务功能总价值,元; VC_{fk} 为研究区第 k 种土地利用类型的第 f 项的年生态系统服务价值,元/hm^2。

2.3.4　流域情景设计　近年来,国家及地方加大了对石羊河流域的治理力度,采取了实施生态绿化工程、生态移民和推行集约生产等多种措施来改善石羊河环境。在此基础上,基于适宜绿洲面积和耕地数量安全底线,以绿洲生态价值等计算中涉及的绿洲主要特征指标的组合变换对石羊河流域进行规划情景假设。在规划情景假设中,以实测数据的 2014 -2018 共 5 a 的计算平均值作为参照情景 (business as usual, BAU)。情景 1 ~4 为减少的情景,即:情景 1 为人口和耕地面积的减少;情景 2 为工业的减少;情景 3 为畜牧业的减少;情景 4 为人口、面积、畜牧业和工业的组合的减少。情景 5 ~8 为增加的情景,即:情景 5 为人口和耕地面积的增加;情景 6 为工业的增加;情景 7 为畜牧业的增加;情景 8 为人口、耕地面积、畜牧业和工业的组合的增加。增加和减少的幅度变化为 20%,具体的情景设计如表 1 所示。

情景设计中指标变化及其影响对应的数据指标的变化具体为:(1)人口变化对应人口数量、居民生活用水及国民生产总值中第三产业占比的变化,主要影响绿洲适宜面积及耕地底线面积;(2)耕地变化对应耕地面积相应幅度变化,主要影响耕地底线面积及土地生态价值;(3)工业变化对应工业用水及国民生产总值中第二产业价值相应幅度变化,主要影响绿洲适宜面积及社会经济价值;(4)畜牧业变化对应畜牧业用水及国民生产总值中第一产业价

值相应幅度变化，主要影响绿洲适宜面积及社会经济价值。

表 1　石羊河流域规划情景设计

情景编号	情景设计
情景 1	人口数量减少 20% + 耕地面积减少 20%
情景 2	工业产值减少 20%
情景 3	畜牧业减少 20%
情景 4	人口数量减少 20% + 耕地面积减少 20% + 工业产值减少 20% + 畜牧业规模减少 20%
情景 5	人口数量增加 20% + 耕地面积增加 20%
情景 6	工业产值增加 20%
情景 7	畜牧业增加 20%
情景 8	人口数量增加 20% + 耕地面积增加 20% + 工业产值增加 20% + 畜牧业规模增加 20%

3　结果与分析

3.1　绿洲适宜面积

考虑到石羊河流域中、下游为绿洲分布的主要区域，以下游民勤县红崖山雨量站作为代表站，对站内逐月降雨量进行分析并计算雨量站全年降水量，将此降水量作为计算值。进行绿洲适宜面积计算时，以供水量作为用水量。

考虑到目前石羊河流域耕地面积仍占有较大比重，故公式(1)中的 K_p 值，即植物的综合影响系数选取耕地的影响系数 0.9 进行计算。流域多年平均蒸发量按照 1 050.42 mm 计算，公式(1)中的绿洲规模适应性指标 H_0 分别取值为 $H_0 = 0.50$(绿洲处于临界稳定状态) 和 $H_0 = 0.75$(绿洲处于稳定状态)。计算得到的 2014 －2018 年石羊河流域适宜绿洲规模如表 2 所示。

表 2　2014 －2018 年石羊河流域适宜绿洲规模

年份	可用水资源量/$10^8 m^3$	用水量/$10^8 m^3$	多年平均蒸发量/mm	降水量/mm	适宜绿洲规模/$10^4 hm^2$	
					$H_0 = 0.5$	$H_0 = 0.75$
2014	23.51	3.07	1050.42	146.60	50.26	33.51
2015	23.68	3.15		132.20	49.68	33.12
2016	23.33	2.93		143.00	49.97	33.31
2017	22.93	2.47		143.00	50.10	33.40
2018	22.70	2.39		141.20	49.63	33.09

根据表 2 的结果，2014 －2015 年适宜绿洲面积的最小值呈减少趋势，临界稳定状态的适宜绿洲面积由 2014 年的 50.26×10^4 hm^2 降为 49.63×10^4 hm^2；稳定状态的适宜绿洲面积由 33.51×10^4 hm^2 降为 33.09×10^4 hm^2。考虑到用水量呈逐年下降趋势，这种适宜绿洲面积的减少主要是由于区域可用水资源量的减少导致。

3.2　耕地面积安全底线

由公式(2)和 2014 －2018 年石羊河流域的人口数量计算得出逐年耕地数量安全底线值，并通过《甘肃省水资源公报》获得 2014 －2018 年实际耕地面积，如表 3 所示。

表 3　2014 －2018 年石羊河流域耕地数量安全底线

年份	人口数量/10^4	耕地数量安全底线/$10^4 hm^2$	实际耕地面积/$10^4 hm^2$
2014	220.89	15.31	30.48
2015	221.17	15.33	30.82
2016	221.37	15.34	30.82
2017	221.70	15.37	30.88
2018	219.73	15.23	51.86

由表 3 可以看出，2014 －2017 年的实际耕地面积变化不大，2018 年增加明显，各年份实际耕地面积均大于计算的耕地面积安全底线。2014 和 2018 年的石羊河流域实际耕地面积分别是耕地面积安全底线的 1.99 倍和 3.41 倍，说明在石羊河流域还有较大的耕地压缩空间。

3.3　绿洲生态服务价值

依据土地利用情况[23－24]和中国不同陆地生态系统单位生态服务价值[21]，石羊河流域具有绿洲生态服务价值的土地利用类型有耕地、林地、草地、水域及荒漠(未利用土地)。2014 －2018 年石羊河流域绿洲各土地利用类型生态系统价值计算结果如表 4 所示。

表 4　2014 －2018 年石羊河流域绿洲各土地利用类型生态系统价值　10^8 元

年份	林地	草地	耕地	水域	未利用地	总价值
2014	85.67	33.28	27.94	24.79	8.23	179.90
2015	51.25	55.58	28.25	9.51	9.16	153.75
2016	56.38	58.36	28.25	8.56	8.24	159.78
2017	62.01	61.28	28.33	7.70	7.42	166.74
2018	68.22	64.34	47.46	6.93	6.68	193.72

分析表 4 可知，在石羊河流域，生态系统服务价值减幅最大的是水域，2018 年比 2014 年减少了

72.04%;增幅最大的是草地,2018 年比 2014 年增加了 93.33%。流域的生态系统服务价值总量从 2014 年的 179.90 $\times 10^8$ 元增加至 2018 年的 193.72 $\times 10^8$ 元,增加了 13.82 $\times 10^8$ 元。

3.4　情景假设分析

各情景规划下主要指标的变化如表 5 所示。

表 5　各情景规划下主要指标的变化

情景设计	绿洲适宜面积/10^4hm^2	耕地数量安全底线/10^4hm^2	绿洲生态价值/10^8元	社会经济价值/10^8元	总价值/10^8元
BAU 情景	[33.28, 49.93]	15.32	170.78	634.06	804.84
情景 1	[33.52, 50.28]	12.25	164.36	560.91	725.27
情景 2	[33.86, 50.79]	15.32	170.78	580.41	751.19
情景 3	[33.39, 50.09]	15.32	202.21	609.81	812.02
情景 4	[34.20, 51.30]	12.25	195.79	487.85	683.64
情景 5	[33.05, 49.58]	18.38	177.19	707.22	884.41
情景 6	[32.71, 49.06]	15.32	170.78	687.73	858.51
情景 7	[33.18, 49.77]	15.32	149.44	658.32	807.76
情景 8	[32.37, 48.56]	18.38	155.86	789.99	945.85

由表 5 可看出,绿洲适宜面积最小值为情景 8 的 32.37 $\times 10^4$ hm^2,最大值为情景 4 的 51.30 $\times 10^4$ hm^2;耕地数量安全底线的最小值为情景 1 和情景 4 的 12.25 $\times 10^4$ hm^2,最大值为情景 5 和情景 8 的18.38 $\times 10^4$ hm^2;绿洲生态价值的最小值为情景7 的 149.44 $\times 10^4$ 元,最大值为情景 3 的 202.21 $\times 10^8$ 元;社会经济价值的最小值为情景 4 的 487.85 $\times 10^8$ 元,最大值为情景 8 的 789.99 $\times 10^8$ 元;绿洲生态价值和社会经济价值之和(总价值)的最小值为情景 4 的 683.64 $\times 10^8$ 元,最大值为情景 8 的 945.85 $\times 10^8$ 元。

根据以上情景假设分析的结果可知,对人口、耕地、工业、畜牧业进行同时或分别减少时,适宜绿洲规模呈现出增大的趋势,这主要是由于绿洲适宜面积计算方法(公式(1))涉及到的耗水量及可利用水量相对关系的增加所致;耕地数量安全底线的变化主要由人口数量决定,在人口减少的情景设计中,耕地数量安全底线降低,在人口增加的情景设计中,耕地数量安全底线增加,不涉及人口数量变化的耕地数量安全底线无变化;绿洲生态价值的变化主要由绿洲景观类型面积的改变导致,在情景假设分析中,绿洲景观类型面积的变化主要考虑由人为活动直接影响的耕地及草地面积的变化,两者的生态价值系数存在一定差异,且初始面积也存在差异,因而两者的最终变化对生态价值有不同程度的影响。在社会经济价值中,其组成划分为第一产业、第二产业及第三产业,上述各个因素的变化涉及到不同产业的变化,从而对社会经济价值状况产生一定的影响。

总体来说,前 4 种减少的情景设计中,社会经济价值主要呈现减少趋势;后 4 种增加的情景设计中,社会经济价值主要呈现增加趋势。由于流域的社会经济价值是流域的生态价值的数倍,因此流域总价值主要受到社会经济价值变化的影响,在前 4 种减少的情景设计中呈现减少趋势,而后 4 种增加的情景设计中呈现增加趋势。结合近年来石羊河流域实际情况的变化,即第三产业所占的比重越来越大,对第三产业产生主要影响的人口因素将发挥更大的作用。在情景假设分析中,增加人口数量、工业产值、畜牧业规模和耕地面积将导致适宜绿洲面积减少、人口耕地数量安全底线增大、社会经济价值和流域总价值增加。

4　讨　论

在人工绿洲中,耕地及其灌溉活动是对绿洲景观影响较大的因素,而耕地也是人类活动可控可调因素中最主要的土地利用类型。文献[25]中对民勤县绿洲的研究结果表明,人为生态输水在 2000－2015 年对于绿洲的耕地适宜面积影响较大,2000 年和 2015 年的民勤绿洲耕地适宜面积分别为 2.5 $\times 10^4$ 和 5.3 $\times 10^4$ hm^2,而实际的耕地面积变化不大,2000 年为 10.56 $\times 10^4$ hm^2,2015 年为 10.03 $\times 10^4$ hm^2,实际的耕地面积约为耕地适宜面积的两倍(2015 年),这与本文中表 3 的结果类似。本研究基于人口的变化对耕地数量底线进行估算,通过对比发现,石羊河流域实际的耕地面积远远大于耕地数

量底线，具有较大的可调整空间。绿洲生态价值主要体现在各种绿洲景观类型面积及其对应的价值系数上，本研究由于采用的耕地和草地的生态服务价值较为接近，在情景假设分析中对于考虑人口耕地面积和畜牧业变化中生态服务价值的变化有相似的结果，例如情景1和情景3。社会经济价值主要是由人类社会三产的情况决定，近年来石羊河流域的社会经济价值呈现稳定的增加趋势。

对于绿洲的发展演化来说，水依然是最主要的制约因素。文献[26]中对阿克苏适宜绿洲规模与耕地面积的研究表明，耕地面积超出了水资源可承载的能力，退耕还林和退耕还草仍然是未来主要的政策导向。绿洲生态价值的评估多来自于不同的土地利用方式的差异[27]，事实上绿洲适宜面积、耕地数量底线、绿洲生态价值和社会经济价值这4个指标之间存在一定的制约关系。在情景假设结果的分析中，这种制约关系主要体现在参与计算的各个具体指标的变化上。例如，在情景1中，人口和耕地的变化对于绿洲生态价值和社会经济价值均有影响，使其分别减少了3.70%和11.54%。本研究将涉及绿洲演变气候条件和人类活动下的流域可利用水资源情况、绿洲景观类型和绿洲社会经济因素等整合在公式中，基于对绿洲适宜面积、耕地数量底线、绿洲生态价值和社会经济价值2014－2018年的变化和多种情景设计下的计算结果做出分析，相应结果对于分析石羊河流域绿洲当前的发展形势和指导绿洲未来的发展具有一定的参考价值。

5　结　论

(1)石羊河流域2014－2018年平均绿洲适宜面积在$33.09\times10^4\sim50.26\times10^4$ hm^{2}之间；平均耕地数量底线为15.32×10^4 hm^2；平均河流域生态价值为170.78×10^8元；2014－2018年间，三者均呈现减少趋势。

(2)绿洲生态价值受畜牧业的影响最大，最小值和最大值分别为假设畜牧业增加(情景7)的149.44×10^8元和假设畜牧业减少(情景3)的202.21×10^8元。

(3)绿洲生态价值和社会经济价值总和的最小值为假设减少人口、减少耕地面积、减少畜牧业和减少工业情景组合(情景4)的683.64×10^8元，最大值为假设增加人口、增加耕地面积、增加畜牧业和增加工业情景组合(情景8)的945.85×10^8元。

参考文献：

[1] 赖先齐，王江丽，程勇翔，等. 中国西北及中亚主要绿洲农区分类[J]. 生态学报，2015，35(2)：237－245.
[2] 刁维杰，赵 勇，翟家齐，等. 1987－2017年民勤绿洲面积时空演变规律及驱动因素解析[J]. 灌溉排水学报，2019，38(10)：106－113.
[3] 张军峰，孟凡浩，包安明，等. 新疆孔雀河流域人工绿洲近40年土地利用/覆被变化[J]. 中国沙漠，2018，38(3)：664－672.
[4] 马依拉·热合曼. 渭库绿洲景观格局与生态系统服务价值时空变化研究[D]. 乌鲁木齐：新疆大学，2019.
[5] 庄庆威，吴世新，罗格平，等. 新疆绿洲变化与资源配置协调性分析[J]. 干旱区地理，2020，43(5)：1298－1306.
[6] 马红勇，庞 成，白青华，等. 气候暖湿变化对黑河流域绿洲农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究，2015，33(1)：225－232.
[7] 白松竹，李 焕，张林梅. 阿勒泰地区冬季降水变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象，2014，8(1)：17－22.
[8] 张雪琪，满苏尔·沙比提，马国飞. 近60年来叶尔羌河平原绿洲气候变化特征分析[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版)，2017，36(3)：17－24.
[9] SCHLESINGER W H，REYNOLDS J F，CUNNINGHAM G L，et al. Biological feedbacks in global desertification[J]. Sciences，1990，247(4946)：1043－1048.
[10] PANNKOV E I，KUZMINA Z V，TRESHINKIN S E. The water availability effect on the soil and vegetation cover of Southern Gobi Oases[J]. Water Resource，1994，21(3)：358－364.
[11] 杨怀德，冯 起，郭小燕，等. 基于回归模型预测的民勤绿洲地下水位动态驱动因子分析[J]. 干旱区资源与环境，2017，31(2)：98－103.
[12] 甘肃省水利厅石羊河流域管理局. 2014－2018年石羊河流域水资源公报[R]. 武威：甘肃省水利厅石羊河流域管理局，2014－2018.
[13] 甘肃省水利厅. 2014－2018年甘肃省水资源公报[R]. 兰州：甘肃省水利厅，2014－2018.
[14] 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)：26－30.
[15] 郝丽娜，粟晓玲. 黑河干流中游地区适宜绿洲及耕地规模确定[J]. 农业工程学报，2015，31(10)：262－268.
[16] 马黎华，康绍忠，粟晓玲. 西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱地区农业研究，2008，26(1)：125－130.
[17] 陈昌毓. 河西走廊绿洲和耕地的适宜面积及其沙害防治对策[J]. 干旱地区农业研究，1990，8(2)：30－37.
[18] 陈亚宁，陈亚鹏，朱成刚，等. 西北干旱荒漠区生态系统可持续管理理念与模式[J]. 生态学报，2019，39(20)：7410－7417.

(下转第115页)

[7] 王鸿翔,陈秋米,张海涛,等.基于主成分分析的宁夏水资源承载力研究[J].中国农村水利水电,2018(11):30-34.
[8] 柴乃杰,贾鼎元,曾小雪.水资源承载力的灰色模糊可变决策模型及应用[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):70-76.
[9] 叶 飞,方国华,金菊良.基于灰色聚类集对分析法的水资源承载力评价模型[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):30-36.
[10] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409.
[11] 周云哲.基于"量质域流"的水资源荷载均衡评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
[12] 许 杨,陈 菁,夏 欢,等.基于 DPSR-改进 TOPSIS 模型的淮安市水资源承载力评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):47-52+62.
[13] 张凤太,王腊春,苏维词.基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J].中国环境科学,2015,35(11):3511-3520.
[14] WANG Qiang, ZHAN Lina. Assessing the sustainability of the shale gas industry by combining DPSIRM model and RAGA-PP techniques: An empirical analysis of Sichuan and Chongqing, China[J]. Energy, 2019, 176: 353-364.
[15] 杨 俊,李雪铭,李永化,等.基于 DPSIRM 模型的社区人居环境安全空间分异[J].地理研究,2012,31(1):135-143.
[16] 沈晓梅,姜明栋.基于 DPSIRM 模型的河长制综合评价指标体系研究[J].人民黄河,2018,40(8):78-84+90.
[17] 张 峰.基于 SD 和 DPSIRM 模型的饮马河流域生态脆弱性评价[D].长春:东北师范大学,2019.
[18] 董振华.基于 DPSIRM 和 SD 模型的草原生态安全评价研究[D].长春:东北师范大学,2017.
[19] 左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重的 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].水资源保护,2020,36(2):1-7.
[20] 雷勋平,邱广华.基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J].环境科学学报,2016.36(1):314-323.
[21] 山西省水利厅.山西省水资源公报[M].北京:中国水利水电出版社,2011-2018.
[22] 太原市统计局.太原统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2012-2019.
[23] 罗 浩,周维博,白洁芳,等.基于 GC-TOPSIS 模型的水资源管理绩效评价及障碍度分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):26-31.
[24] 周 磊,黄秋昊.基于灰色关联 TOPSIS 模型的城市土地效益评价及障碍因子诊断[J].水土保持研究,2014,21(4):39-41.
[25] 刘 爽.基于熵权法与 TOPSIS 模型的高效图书馆电子资源绩效评价实证研究[D].沈阳:辽宁大学,2016.
[26] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局.城市居民生活用水量标准:GB/T 50331—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
[27] 国务院.实行最严格水资源管理制度考核办法[EB/OL].(2013-01-06)[2021-04-02] http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/06/content_2305762.htm
[28] 马 强.环境变化对太原地区水资源的影响研究[J].山西水利,2012,28(12):1-2.
[29] 李振栓,王晋伟.采煤队山西地下水水资源的破坏及污染[J].中国煤炭地质,2019,31(5):42-44+59.
[30] 乔小娟,李国敏,周金龙,等.采煤对地下水资源与环境的影响分析[J].水资源保护,2010,26(1):49-52.

(上接第 108 页)

[19] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜.区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J].地理学报,2002,57(2):127-134.
[20] 唐华俊,李哲敏.基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究[J].中国农业科学,2012,45(11):2315-2327.
[21] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
[22] 古丽波斯坦·巴图,丁建丽,李艳菊.干旱区土地利用/覆盖变化与生态环境效应研究——以渭-库绿洲为例[J].草地学报,2018,26(1):53-61.
[23] 李克红,任 勤,侯燕君.石羊河流域重点区土地利用现状遥感调查与解译分析[J].地下水,2017,39(6):158-159.
[24] 杨亮洁,杨永春.石羊河流域土地利用变化对区域碳排放和碳吸收的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(6):749-756+763.
[25] 李 森,王 涛,张志山,等.生态输水后民勤盆地绿洲适宜规模及结构变化[J].中国沙漠,2020,40(6):91-97.
[26] 王志成,蒋军新,方功焕,等.水资源约束下的阿克苏河流域适宜绿洲规模分析[J].冰川冻土,2019,41(4):986-992.
[27] 孟阳阳,何志斌,刘 冰,等.干旱区绿洲湿地空间分布及生态系统服务价值变化——以三大典型内陆河流域为例[J].资源科学,2020,42(10):2022-2034.