文章编号:1000-7601(2016)01-0206-07

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.01.32

气候变化条件下石羊河流域农业灌溉 需水量的模拟与预测

牛纪苹^{1,2},粟晓玲¹,唐泽军² (1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100; 2.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

摘 要:根据石羊河流域及周边共11个气象站点1959—2012年的逐日气象资料,利用大气环流模型 HadCM3 的输出和 SDSM 统计降尺度模型,生成 A2、B2 两种排放情景下未来石羊河流域各站点2020 s,2050 s 和 2080 s 的 ET₀ 和降水日值;使用作物系数法,扣除有效降雨量,计算现状和未来不同作物净灌溉定额、流域净灌溉需水量和耗水量;应用反距离加权插值法(IDW)研究作物净灌溉定额的空间分布特征。结果表明,石羊河流域小麦、玉米、甜椒、棉花、胡麻和苹果的多年平均作物净灌溉定额都呈现从西南到东北递增的趋势,预测未来气候变化情景下,6种典型作物净灌溉定额呈增加趋势;多年平均流域净灌溉需水量为12.65×10⁸ m³,多年平均耗水量为15.42×10⁸ m³;在 种植结构维持现状条件下,预计2020 s,2050 s 和 2080 s,在 HadCM3 模式的 A2 情景下净灌溉需水量分别为 13.45×10⁸ m³、15.02×10⁸ m³、16.94×10⁸ m³、15.51×10⁸ m³、16.65×10⁸ m³、16.34×10⁸ m³、17.00×10⁸ m³,未来流域净灌溉需水量和耗水量都呈明显上升趋势,且 A2 情景下的上升幅度大于 B2 情景。石羊河流域的农业灌溉需水在未来将持续增加,2050 s 之后增加趋势更为显著。

关键词: 气候变化;灌溉需水;石羊河流域;SDSM

中图分类号: S274; S161 文献标志码: A

Simulation and estimation of impact from climatic changes on irrigation water requirement in Shiyang River Basin

NIU Ji-ping^{1,2}, SU Xiao-ling¹, TANG Ze-jun²

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Upon the simulation and estimation of the impact from climatic changes on net irrigation requirement quota of crop, irrigation water requirement (I_N) and total crop water demand (W_t) in Shiyang River Basin could provide support for efficient use of water resources and sustainable development of agriculture. While daily ET_0 and precipitation in 2020 s, 2050 s and 2080 s were downscaled from HadCM3 (Hadley centre Coupled Model, version 3) outputs under A2 and B2 emission scenarios by SDSM (Statistical Downscaling Model), based on meteorological data from 11 meteorological stations located in and around the Shiyang River Basin during 1951—2012. Net irrigation requirement quota, I_N and W_t were calculated by using crop coefficient method, and removing the effective rainfall. The spatial distribution of net irrigation requirement quota was investigated by Inverse Distance Weighted Interpolation. The results showed that net irrigation requirement quota performed an increasing tendency from southwest to northeast gradient for wheat, maize, sweet pepper, cotton, sesame and apple. HadCM3 projected an increasing trend for these six typical crops. The present I_N and W_t were 12.65 × 10⁸ m³ and 15.42 × 10⁸ m³, respectively in the whole basin. When the present planting structure was maintained, under A2 emission scenario, the I_N were 13.45 × 10⁸ m³, respectively in 2020 s, 2050 s and 2080 s.

收稿日期:2015-03-06

作者简介:牛纪苹(1989—),女,山东日照人,博士研究生,主要从事农业水土资源利用与保护研究。

通信作者:粟晓玲(1968—),女,四川开江人,教授,博士,博士生导师,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:suxiaoling17@126.com。

Under B2 emission scenario, the I_N were 13.55×10^8 m³, 14.63×10^8 m³, and 15.51×10^8 m³, and the W_t were 15.56×10^8 m³, 16.34×10^8 m³, and 17.00×10^8 m³ respectively in 2020 s, 2050 s and 2080 s. A remarkable increasing temporal trend was observed in net irrigation water requirement, I_N and W_t . The increase under B2 scenario was lower than that under A2 scenario. There would be a significant increasing trend about requirement of irrigation water in the future, which would especially be more significant after the 2050 s.

Keywords: climatic change; net irrigation water requirement; Shiyang River Basin; SDSM

干旱地区既是生态脆弱区,更是气候敏感区,受 气候变化的影响非常明显。有研究表明,气候变化 会导致水分蒸发量增大,最终会导致土壤有效水分 减少,作物受旱减产^[1]。因此,探讨气候变化下未来 农业灌溉需水的时空分布特征,可为作物种植结构 的调整和指导适应气候变化的流域水资源规划与管 理提供重要依据。

气候变化研究主要有三类方法^[2]:趋势统计分 析法、增量情景法^[3-4]和模型模拟法,其中模型模拟 法是应用气候模式模拟气候条件,结合作物生长模 型定量研究气候条件对作物灌溉需水量的影响。相 对于仅研究气象要素与农业灌溉需水之间变化趋势 关系的趋势统计分析,以及人为假定气象要素变化 幅度的增量情景,模型模拟法利用大气环流模型 GCM 更能反映气候因子变化的大气环境物理基础, 而统计降尺度技术的使用,使低分辨率的 GCM 输出 转化为高分辨率、区域尺度,进一步提高了模型模拟 法结果在区域尺度的适应性和精度。

丛振涛等^[5]使用 SRA1B 情景下大气环流模式 MIROC312 的输出,预测未来 50 年中国的作物需水 量和灌溉需水量总体上呈增加趋势;王卫光等^[6]使 用 HadCM3 气候模式结合 ORYZA2000 水稻模型研 究发现,以1961-2010年为基准期,在间歇灌溉和 淹水灌溉模式下,苏南地区未来水稻耗水量和灌溉 需水量均呈增加趋势; Gohari^[7]使用 GCM 结合天气 发生器 LARS - WG 研究发现, 伊朗 Zayandeh - Rud 河流域 2015—2044 年温度上升、降水下降将导致灌 溉需水量持续上升;Chung^[8]计算韩国南部地区的灌 溉需水量在基准年为 410 mm,使用大气环流模式 HadCM3 研究发现,在 A2 和 B2 情景下 2050 s 将下 降4%和8%,在A2和B2情景下的2080s将下降 10%和2%; Schaldach^[9]在大气环流模式 IPCM4 的干 旱情景下,预计2050 s 欧洲的灌溉需水量下降1%, 达到 530.6 亿 m³,在 MIMR 的湿润情景下,下降 5%,达到512.3亿m3;Gondim等^[10]使用动力降尺度 模型 PRECIS 和大气环流模式 HadCM3,预测 Jaguaribe流域的灌溉用水量与基准期(1961—1990 年)相比,在 2025-2055 年 A2 和 B2 情景下,将分别

增长 7.9% 和 9.1%; Chiang^[11]使用 5个大气环流模式 GCMs 和水文模型 GWLF, 预测在 A2 情景下, 台湾南部地区缺水率在未来短期、中期和长期时间段内分别为 23.8% ~ 33.1%, 25.2% ~ 32.2%, 25.0% ~ 36%, 可见随着时间的推移, 水资源短缺日益严峻。

石羊河流域位于甘肃省河西地区东段,介于祁 连山东段与巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠南缘之间,东 经 101°41′~104°16′,北纬 36°29′~39°27′。流域降水 稀少,干旱缺水。根据牛纪苹等研究,预测在 Had-CM3 模式的 A2 排放情景下, 2020 s、2050 s 和 2080 s 流域参考作物蒸发蒸腾量将分别增加 6%、14% 和 23%, B2 情景下将分别增加 7%、12% 和 17%^[12]。 考虑降雨的变化,未来流域主要作物的灌溉需水和 总耗水如何变化,还需要进一步研究。已有的气候 变化对石羊河流域灌溉需水的影响研究主要针对单 一作物,如熊伟等^[13]采用区域气候模式 PRECIS 结 合 CERES - Maize 模型,发现气候变化使石羊河流域 玉米生育期普遍缩短,实际蒸散量和灌溉用水量总 体呈现降低趋势;陈超等[14]采用区域气候模式 PRECIS 结合 COSIM 棉花模型,发现在未来的气候变 化情景下,棉花的耗水量和参考作物蒸发蒸腾量明 显提高。

本研究以石羊河流域为研究区,基于 1959—2012年的长系列日气象资料,利用作物系数法、大 气环流模型 HadCM3 和统计降尺度模型 SDSM,计算 并预测了石羊河流域 1959—2012 年和未来 A2、B2 两种排放情景下 2020 s(2011—2040 年),2050 s (2041—2070 年)和 2080 s(2071—2099 年)小麦、玉 米、甜椒、棉花、胡麻和苹果 6 种典型作物净灌溉定 额(*I*)、流域及各区县总净灌溉需水量(*I*_N)和农业耗 水量(*W*_t),以期为流域未来的节水规划及种植结构 调整提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

数据资料主要包括实测气象数据和各种作物的 种植面积。其中,实测气象数据来自中国气象科学 数据共享服务网,包括石羊河流域及其周边共11个 气象站(见图 1)1951—2012 年逐日平均温度、最高 温度、最低气温、相对湿度、风速和日照时数等气象 资料,各气象站的海拔高度、经纬度等地理信息资料。

流域各区县各种作物的种植面积来自于统计年鉴,流域内门源、山丹及肃南的耕地面积很少,天祝 有部分属于黄河流域,由于资料所限,本文将古浪、 民勤、天祝、凉州和永昌的灌溉需水量作为石羊河流 域总的灌溉需水量。



图1 研究区及周边气象站点分布

Fig.1 Location of meteorological stations in study area

1.2 净灌溉定额(I)、总净灌溉需水量(I_N)和农业 耗水量(W_i)的计算

净灌溉定额(1)是指必须通过灌溉补充的土壤 原有储水量和有效降雨量及地下水利用量不能满足 作物蒸发蒸腾、冲洗盐碱以及其他方面要求的水 量^[15]。由于石羊河流域地下水埋深小于 5 m 的面 积很少,因此忽略地下水的补给,并不考虑冲洗盐碱 的净灌溉需水量,各作物净灌溉定额(1)采用下式计 算:

$$I = ET_c - P_e \tag{1}$$

式中,I为作物净灌溉定额(mm); ET_c 为作物蒸发蒸腾量(mm); P_e 为作物生育期内的有效降雨量(mm)。

作物需水量采用下式计算:

$$ET_c = \sum K_{ci} \times ET_{0i} \tag{2}$$

式中, ET_c 为作物需水量(mm); K_{ci} 为全生育期第 *i* 生长阶段的作物系数; ET_{oi} 为对应该生长阶段的参 考作物蒸发蒸腾量(mm·d⁻¹),采用 FAO(世界粮农 组织) 推荐的 Penman – Monteith^[16-17](简称 PM 公 式) 计算,公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

式中: ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量(mm·d⁻¹); R_n 为 作物表面净辐射量(MJ·m⁻²·d⁻¹); G 为土壤热通量 (MJ·m⁻²·d⁻¹); γ 为湿度计常数(kPa· \mathbb{C}^{-1}); T 为 空气平均温度(\mathbb{C}); u_2 为地面以上 2 m 高处的风速 (m·s⁻¹); e_s 为空气饱和水汽压(kPa); e_a 为空气实 际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的 斜率(kPa· \mathbb{C}^{-1})。

作物系数 K_c 值的选取参考已有的研究成果^[18-20]。

农业有效降雨量采用降雨有效利用系数来计 算^[21]:

$$P_e = \sum \sigma P \tag{4}$$

式中, P_e 为作物生育期内有效降雨量(mm); P 为日降雨量(mm); σ 为日降雨量有效利用系数(P < 5mm, $\sigma = 0$; $5 \text{ mm} \leq P \leq 50 \text{ mm}, \sigma = 1$; $P > 50 \text{ mm}, \sigma = 0.8$)。

农业总净灌溉需水量采用下式计算:

$$I_N = \frac{1}{1000} \sum \left(I_j \times A_j \right) \tag{5}$$

式中, I_N 为总净灌溉需水量(10^8 m^3); I_j 为第j种作物 全生育期净灌溉定额(mm); A_j 为第j种作物播种面 积(10^4 hm^2)。

农业耗水量采用下式计算:

$$W_t = \frac{1}{1000} \sum \left(ET_{cj} \times A_j \right) \tag{6}$$

式中, W_t 为农业耗水量(10⁸ m³); ET_{cj} 为第 j 种作物 全生育期蒸发蒸腾量(mm); A_j 为第 j 种作物播种面 积(10⁴ hm²)。

1.3 统计降尺度模型 SDSM

在进行区域尺度气候变化研究时,为了解决 GCM 空间尺度不匹配的问题,必须充分应用降尺度 技术^[22],本文采用统计降尺度模型 SDSM 4.2 版本 预测石羊河流域未来的日 *ET*₀ 和日降水,统计降尺 度模型 SDSM 的具体步骤详见参考文献 13。

1.4 IDW 插值

在 ArcGIS 下通过反距离权重插值方法(IDW)获 得石羊河流域小麦和玉米等 6 种典型作物净灌溉定 额(*I*)多年平均及未来的空间分布图。

2 结果与分析

2.1 1959-2012 年各作物多年平均净灌溉定额

石羊河流域现状种植结构中,小麦、玉米、蔬菜、 棉花、水果、油料作物分别占总播种面积的29%、 15%、14%,6%、6%及5%,合计占75%。因此以小 麦、玉米、甜椒(代表蔬菜)、棉花、胡麻(代表油料作

(3)

物)和苹果(代表水果)6种主要作物为例,研究石羊河流域多年平均及未来净灌溉定额的时空变化。

1959—2012 年流域各区县各作物生育期内的平 均净灌溉定额见表 1,6 种典型作物的净灌溉定额的 空间分布如图 2。小麦的净灌溉定额呈现出从西南 的祁连山区到东北绿洲平原递增的趋势,最大值达 603 mm,位于凉州区,而最小值 217 mm,位于天祝 区;玉米的净灌溉定额空间分布趋势与小麦基本相 同,其最大值为 325 mm,位于民勤,最小值为 96 mm, 位于天祝。结合石羊河流域 1959—2012 年平均降 水的空间分布,可以看出流域内降水量越少的区域, *I* 值越大,这与杨兴国^[23]的研究所得规律一致。

表 1 石羊河流域行政区各作物生育期内多年平均和未来 2050 s 平均净灌溉定额/mm

Table 1 Average irrigation quota on a variety of crops in each county of Shiyang River Basin during 1959-2012 and 2050 s

作物 Crops	年代 Year	古浪 Gulang	民勤 Minqin	天祝 Tianzhu	凉州 Liangzhou	永昌 Yongchang	石羊河流域 Shiyang River Basin
	多年平均 The annual mean	407	586	217	603	438	486
小麦 Wheat	2050s – A2	558	621	335	649	481	568
	2050s - B2	534	616	307	632	456	548
	多年平均 The annual mean	187	325	96	255	240	253
玉米 Maize	2050s – A2	311	351	195	292	286	300
	2050s - B2	306	353	186	294	276	300
	多年平均 The annual mean	409	621	237	503	459	475
甜椒 Sweet pepper	2050s – A2	582	682	370	542	521	539
Sweet pepper	2050s - B2	570	676	349	536	509	530
	多年平均 The annual mean	88	312	22	226	189	312
棉花 Cotton	2050s - A2	275	348	94	280	246	348
	2050s - B2	266	352	76	274	228	352
	多年平均 The annual mean	292	518	154	410	373	365
胡麻 Sesame	2050s - A2	465	569	249	462	432	443
	2050s - B2	448	567	223	447	408	427
	多年平均 The annual mean	134	343	42	171	225	226
苹果 Apple	2050s - A2	301	384	109	311	278	331
	2050s - B2	290	382	88	297	255	320

2.2 多年平均农业灌溉需水量

流域各区县多年平均农业耗水量 W_t 和净灌溉 需水量 I_N 值如表 2 所示,结果表明,流域多年平均 I_N 为 12.65×10⁸ m³,多年平均 W_t 为 15.42×10⁸ m³; 多年平均净灌溉需水量 I_N 的大小排序为:民勤 303.21 mm > 凉州 286.69 mm > 永昌 257.06 mm > 古 浪 230.14mm > 天祝 126.46 mm,多年平均单位面积 农业总耗水量 W_t的大小排序为:民勤 336.46 mm > 古浪 328.61 mm > 凉州 326.59 mm > 永昌 307.88 mm > 天祝 272.88 mm。

表 2 石羊河流域行政区多年平均农业耗水量(W_t)和净灌溉需水量(I_N)

Table 2	W, and	I_N i	n five	counties	of	Shiyang	River	Basin	over	decades

项目 Items	古浪 Gulang	民勤 Minqin	天祝 Tianzhu	凉州 Liangzhou	永昌 Yongchang	石羊河流域 Shiyang River Basin
$I_N / 10^8 \text{ m}^3$	2.08	3.10	0.38	5.46	1.72	12.65
$W_t/10^8 \text{ m}^3$	2.97	3.44	0.82	6.22	2.06	15.42

2.3 未来各作物净灌溉定额

石羊河流域各气象站 *ET*₀的降尺度模拟效果 见文献 12,流域日降水量模拟值和实测值的确定性 系数 *R*² 见表 3,率定期 *R*² 在 0.23~0.68 之间、验证 期 R² 在 0.30~0.79 之间。月尺度降水模拟效果以 乌鞘岭站为例(图 3),说明降水模拟值的年内分布 与实测值均较为一致,模拟效果比较理想,表明 SDSM 可以用于降尺度处理 GCM 的输出数据。





Fig. 2 Spatial distributions of *I* for six kinds of typical crops in Shiyang River Basin during 1959—2012, 2020s, 2050s, and 2080s under A2 scenarios

A2、B2 情景下未来降水相比基准年 1961—2000 年的变化率如表 4 所示,在 A2 情景下,降水在 2020 s、2050 s 和 2080 s 三个时期将分别下降 5%,13% 和 19%,变幅随时间逐渐增大;B2 情景与 A2 情景的变 化趋势是相同的,未来 3 个时期将分别下降 6%, 11%和 13%。流域降水在未来将持续减少,在 2050 s之后变化趋势将会更为显著。

预测石羊河流域各行政区在 2020 s、2050 s 和 2080 s 各作物生育期内的平均净灌溉定额,以 2050 s 为例,如表 1 所示,不同作物的净灌溉定额对气候变 暖的响应存在着差异。在 ArcGIS 下获得未来 2020 s、2050 s 和 2080 s 小麦、玉米、甜椒、棉花、胡麻和苹果的净灌溉定额在 A2 和 B2 两种气候变化情景下的空间分布图,以 A2 情景为例,如图 2 所示,在 2080 s 流域小麦的净灌溉定额最大值达 701.97 mm,位于凉州区,而最小值位于天祝区,为 404.28 mm; 玉米最大值为 413.28 mm,位于民勤,最小值位于天祝区,为 230.61 mm;小麦和玉米在未来 3 个时期 A2、B2 两种情景下的净灌溉定额空间分布规律与多 年平均分布基本一致,且在时间上呈上升趋势,增幅

逐渐增大,到 A2 情景下的 2080 s,小麦净灌溉定额 比现状年增加 144.52 mm,玉米比现状年增加 90.92 mm;且 A2 情景下的增幅大于 B2 情景。



图 3 乌鞘岭站 SDSM 模拟的月降水和实测月降水序列散点图

 $Fig. \ 3 \quad Downscaled \ versus \ calculated \ monthly \ precipitations$

at Wushaoling station during 1961-2000

表 3 石羊河流域各站点模拟的日降水和实测日降水的确定系数

Table 3	The R^2	of	downscaled	versus	historical	monthly	precipitations	in	Shiyang	River	Basin
---------	-----------	----	------------	--------	------------	---------	----------------	----	---------	-------	-------

		流域区	内 Inside the	river basir	1	流域外 Outside the river basin					
确定系数 <i>R</i> ²	民勤 Minqin	古浪 Gulang	永昌 Yongchang	武威 Wuwei	乌鞘岭 Wushaoling	阿拉善 右旗 Alxa Youqi	山丹 Shandan	张掖 Zhangye	门源 Menyuan	靖远 Jingyuan	景泰 Jingtai
率定期 R ² Clibration period (1961—1990)	0.23	0.39	0.52	0.36	0.62	0.34	0.44	0.42	0.68	0.41	0.36
验证期 R ² Validation period (1991—2000)	0.36	0.48	0.30	0.39	0.63	0.52	0.55	0.52	0.79	0.41	0.47
基准期 R ² Base line (1961—2000)	0.26	0.40	0.45	0.36	0.61	0.38	0.47	0.45	0.71	0.40	0.38

表 4 流域降水 A2 和 B2 两种情景下的变化率

Table 4 Changes of precipitation in the future scenarios in the middle and lower reaches in Shiyang River Basin

基准期 Base line (1961—2000)	A2 The incr	情景下增加幅度/ rease of P under A2	% scenario	B2 情景下增加幅度/% The increase of P under B2 scenario				
降水量 P Precipitation	2020s	2050s	2080s	2050s	2020s	2080s		
247 mm	- 5	- 13	- 19	- 6	- 11	- 13		

2.4 未来农业灌溉需水量

流域各区县未来农业耗水量 W_t 值和净灌溉需 水量 I_N 如表 5 所示,在 A2 情景下,总净灌溉需水量 I_N 和农业总耗水量 W_t 在 2020 s、2050 s 和 2080 s 三 个时期将分别达到 13.45 × 10⁸ m³、15.02 × 10⁸ m³、 16.94 × 10⁸ m³ 和 15.53 × 10⁸ m³、16.65 × 10⁸ m³、 18.18 × 10⁸ m³; B2 情景与 A2 情景的上升趋势相同, 在未来 3 个时期将分别上升到 13.55 × 10⁸ m³、14.63 × 10⁸ m³、15.51 × 10⁸ m³ 和 15.56 × 10⁸ m³、14.63 × 10⁸ m³、17.00 × 10⁸ m³; A2 情景下的增幅在 2020 s 小 于 B2 情景,但在 2050 s 和 2080 s 都大于 B2 情景。 因此,石羊河流域的农业耗水量 W_t 和净灌溉需水 量 I_N 在未来将持续增加,在 2050 s 之后这种上升趋 势将会更为显著。

3 结论与讨论

1) SDSM 模型可以用于 ET_0 和降水的降尺度处理。

2) 石羊河流域小麦、玉米、甜椒、棉花、胡麻和 苹果多年平均净灌溉定额(1)在空间上都呈现从西 南到东北递增的趋势。预测未来气候变化情景下,6 种典型作物的 I 空间分布仍呈现从西南部地区向东 北地区递增的规律,且 I 在时间上都呈现上升趋势, A2 情景下的增幅大于 B2 情景。

3) 石羊河流域多年平均 W_t 和 I_N 分别为15.42 × 10⁸m³、12.65 × 10⁸m³,在未来 A2 情景下, W_t 和 I_N

表 5 石羊河流域行政区未来平均农业耗水量(W_i)和净灌溉需水量(I_N)/10⁸ m³

Table 5 W_t and I_N in five counties of Shiyang River Basin in 2020 s, 2050 s and 2080 s

年代 Year -	古 Gul	古浪 Gulang		民勤 Minqin		天祝 Tianzhu		凉州 Liangzhou		永昌 Yongchang		石羊河流域 Shiyang River Basin	
	W_t	I_N	W_t	I_N	W _t	I_N	W_t	I_N	W_t	I_N	W_t	I_N	
2020s - A2	3.07	2.57	3.39	3.13	0.88	0.49	6.12	5.51	2.07	1.75	15.53	13.45	
2050s – A2	3.37	3.03	3.64	3.36	0.99	0.61	6.46	6.08	2.20	1.95	16.65	15.02	
2080s – A2	3.76	3.58	3.98	3.81	1.13	0.74	6.96	6.70	2.35	2.11	18.18	16.94	
2020s-B2	3.06	2.55	3.42	3.16	0.89	0.47	6.13	5.63	2.06	1.74	15.56	13.55	
2050s-B2	3.26	2.91	3.58	3.35	0.96	0.55	6.40	5.96	2.14	1.86	16.34	14.63	
2080s – B2	3.44	3.19	3.75	3.57	1.02	0.60	6.58	6.20	2.22	1.95	17.00	15.51	

在 2020 s 分别为 15.53 × 10^8 m³、13.45 × 10^8 m³; 在 2050 s 分别为 16.65 × 10^8 m³, 15.02 × 10^8 m³; 在 2080 s 分别为 18.18 × 10^8 m³、16.94 × 10^8 m³。在未来 B2 情 景下, W_t 和 I_N 在 2020 s 分别为 15.56 × 10^8 m³、13.55 × 10^8 m³; 在 2050 s 分别为 16.34 × 10^8 m³、14.63 × 10^8 m³; 在 2080 s 分别为 17.00 × 10^8 m³、15.51 × 10^8 m³。未来 I_N 和 W_t 呈明显上升趋势, 且 A2 情景下的增幅大于 B2 情景。

从总体来看,气候变化使区域农业灌溉需水在 未来呈上升趋势^[5-10],而石羊河流域降水量小、蒸 发量大,灌溉对作物产量起着至关重要的作用。未 来的气候变化会使流域水资源矛盾供需更加突出, 甚至导致灌溉用水进一步挤占生态用水。因此急需 采取措施缓解流域灌溉水供需矛盾突出的状况,如: 科学管理农业灌溉用水,开展农田水利基本建设,推 广旱作节水技术,还可以改变播期、引入早中熟品 种、适当扩大棉花等喜温喜热作物的种植面积等。

本研究在探讨气候变化对石羊河流域农业灌溉 需水的影响时,未考虑作物生育期、品种改良和病虫 害的影响,也未考虑气候变化对作物系数的影响,有 待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 王 媛,方修琦,徐 袋.气候变化背景下"气候产量"计算方法的探讨[J].自然资源学报,2004,19(4):531-536.
- [2] 牛纪苹,粟晓玲,孙聪影.气候变化对石羊河流域农业灌溉需水 的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(6):41-45.
- [3] 刘晓英,林而达.气候变化对华北地区主要作物需水量的影响 [J].水利学报,2004,35(2):77-87.
- [4] 张建平,王春乙,杨晓光,等.未来气候变化对中国东北三省玉 米需水量的影响预测[J].农业工程学报,2009,25(7):50-55.
- [5] 丛振涛,姚本智,倪广恒.SRA1B 情景下中国主要作物需水预测[J].水科学进展,2011,22(1):38-43.
- [6] 王卫光,孙风朝,彭世彰,等.水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J].农业工程学报,2013,29(14):90-98.
- [7] Gohari A, Eslamian S, Abedi-Koupaei J, et al. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin[J]. Sci-

ence of the Total Environment, 2013,442:405-419.

- [8] Chung S O, Rodríguez Díaz J A, Weatherhead E K, et al. Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea[J]. Irrigation and Drainage, 2011,60(2):263-273.
- [9] Schaldach R, Koch J, Aus der Beek T, et al. Current and future irrigation water requirements in pan-Europe: an integrated analysis of socio-economic and climate scenarios[J]. Global and Planetary Change, 2012,94:33-45.
- [10] Gondim R S, de Castro M A H, Maia A H N, et al. Climate change impacts on irrigation water needs in the jaguaribe river basin [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2012, 48(2): 355-365.
- [11] Chiang J L, Liu T M. Impact of climate change on paddy field irrigation in southern Taiwan[J]. Paddy and Water Environment, 2013,11 (1-4):311-320.
- [12] 牛纪苹,粟晓玲.石羊河流域参考作物蒸发蒸腾量对气候变化的响应模拟及预测[J].水利学报,2014,45(3):286-295.
- [13] 熊 伟,冯颖竹,高清竹,等.气候变化对石羊河、大凌河流域 灌溉玉米生产的影响[J].干旱区地理,2011,34(1):150-159.
- [14] 陈 超,潘学标,张立祯,等.气候变化对石羊河流域棉花生产 和耗水的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):57-65.
- [15] 陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉 [M].北京:水利电力出版社,1995.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [17] 康绍忠,刘晓明,熊运章.土壤一植物一大气连续体水分传输 理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.
- [18] 康绍忠,粟晓玲,杜太生.西北旱区流域尺度水资源转化规律 及其节水调控模式——以甘肃石羊河流域为例[M].北京:中 国水利水电出版社,2009.
- [19] 李 霆.石羊河流域主要农作物水分生产函数及优化灌溉制度的初步研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2005.
- [20] 佟 玲.西北干旱内陆区石羊河流域农业耗水对变化环境响应的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [21] 康绍忠,蔡焕杰.农业水管理学[M].北京:中国农业出版社, 1996.
- [22] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. Environmental Modelling and Software, 2002,17(2):147-159.
- [23] 杨兴国,刘宏谊,傅 朝,等.甘肃省主要农作物水分供需特征 研究[J].高原气象,2004,23(6):821-827.