

新疆农业水资源总量控制及承载评估

张爱民¹, 马占宝¹, 郝天鹏¹, 马铁成², 周和平^{3*}

¹新疆白杨河流域管理局, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区灌溉排水发展中心, 新疆 乌鲁木齐

³新疆维吾尔自治区水利管理总站, 新疆 乌鲁木齐

Email: *xjslzhp@126.com

收稿日期: 2020年12月21日; 录用日期: 2021年2月3日; 发布日期: 2021年2月23日

摘要

基于最严格的水资源总量控制目标约束, 研究评估新疆地方系统(不含新疆生产建设兵团)农业灌溉水资源承载力。本文以2018年现状为基准, 综合考虑农业用水在总用水量的占比、滴灌面积在总灌面积的占比、灌溉定额、灌溉水利用系数对灌溉水资源量的影响, 运用水土平衡及系统工程优化评估灌溉水资源承载能力。结果显示: 预期2035年农业用水总量由2018年386.20亿 m^3 降至282.10亿 m^3 , 这一远景目标的实现伴随农业用水占比由91.8%降至74.7%, 毛灌溉定额由7695 m^3/hm^2 下降至5955 m^3/hm^2 , 滴灌面积占比由48.5%提升至86.2%, 灌溉水利用系数由0.542提升至0.650, 由此可承载极限总灌面积为488.15万 hm^2 , 比2018年减少灌溉面积13.52万 hm^2 。分析结果说明, 在十分有限的农业水资源总量控制条件下, 在适宜范围内降低灌区灌溉定额, 提升灌溉水利用系数和滴灌节水规模, 是以水定地稳定总灌面积的重要保障。

关键词

新疆农业, 水资源利用, 承载力, 评估

Total Amount Control and Carrying Capacity Assessment of Agricultural Water Resources in Xinjiang

Aimin Zhang¹, Zhanbao Ma¹, Tianpeng Hao¹, Tiecheng Ma², Heping Zhou^{3*}

¹Xinjiang Baiyang River Basin Administration Bureau, Urumqi Xinjiang

²Irrigation and Drainage Development Center of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang

³Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Management Station, Urumqi Xinjiang

Email: *xjslzhp@126.com

作者简介: 张爱民(1975-), 男, 工程师, 从事水资源及水利工程管理。

*通讯作者。

文章引用: 张爱民, 马占宝, 郝天鹏, 马铁成, 周和平. 新疆农业水资源总量控制及承载评估[J]. 水资源研究, 2021, 10(1): 111-124. DOI: 10.12677/jwrr.2021.101012

Abstract

Based on the most stringent water resources total amount control target constraints, the agricultural irrigation water resources carrying capacity of local systems (without Xinjiang Production and Construction Corps) in Xinjiang are studied and evaluated. Using 2018 as the benchmark, this paper comprehensively considers the effects of the proportion of agricultural water in total water consumption, the proportion of drip irrigation area in total irrigation area, irrigation quota and irrigation water utilization coefficient on irrigation water resources, and evaluates the carrying capacity of irrigation water resources by using water and soil balance and system engineering optimization. The results show that the total amount of water used for agriculture is expected to decrease from 38.620 billion m³ in 2018 to 28.210 billion m³ in 2035. The achievement of this long-term goal is accompanied by the decrease of agricultural water use from 91.8% to 74.7%, the decrease of gross irrigation quota from 7695 m³/hm² to 5955 m³/hm², the increase of drip irrigation area from 48.5% to 86.2%, and the increase of irrigation water use coefficient from 0.542 to 0.650. The ultimate carrying capacity of the total irrigated area is 4.881.5 million hm², which is 135.2 million hm² less than 2018. Analysis results show that under the condition of limited total amount of agricultural water resources, the irrigation quota can be reduced and the irrigation water use efficiency and water saving scale can be increased, which is an important guarantee to stabilize the total irrigation area with water.

Keywords

Xinjiang Agriculture, Water Resources Utilization, Carrying Capacity, Evaluation

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新疆是我国典型的沙漠绿洲灌溉农业,水利灌溉水资源节约高效利用,在农业经济发展中具有重要地位并起到特殊作用。基于最严格的水资源总量控制研究分析农业用水承载力,对推进新疆经济社会生态可持续发展具有重要现实意义。新疆水资源利用效率方面,张羽威[1]等人采用 GIS 与空间相关法分析表明,新疆各地二产、三产 GDP 与用水量为空间负相关,第一产业用水量在空间对 GDP 影响成正相关具有一定空间聚集性,说明农业用水量表现集中。杜根[2]等人对新疆地州农业水资源利用效率研究认为,农业水资源利用效率呈现北疆、东疆及南疆依次递减,克拉玛依、昌吉州、塔城地区、巴州、和田、吐鲁番等农业用水处于高效率状态。周和平[3]等人基于水资源利用技术指标,采用综合评价和柯布道格拉斯模型分析现状与未来 15 项投入因素对总用水量的影响,结果表明,现状水资源利用综合量级为 3 级,规划至 2030 年综合量级达到 2.54~3.0 级总体处于可持续状态。张振龙[4]等人运用 VAR 模型和 ADF 检验、脉冲响应函数及方差贡献度分解,对近年新疆耗水产业生态系统和经济增长分析表明,经济增长与总用水量、工业和农业用水之间存在长期均衡关系,新疆经济快速增长伴随着水资源大力开发和过度利用,并建议实施严格的退地减水政策,明确用水总量控制和定额指标维持新疆水资源可持续利用。胡宝华[5]等人通过综合评价模型探析水资源承载力空间布局,表明新疆水资源综合承载布

局呈现南疆弱北疆强、东疆弱西部强格局，且水资源支持力、水资源经济承载力、农业承载力、农村承载力、城镇承载力、生态承载力六个因子空间布局呈现区域差异性。雷亚君[6]等人对新疆 2005~2014 年水资源生态足迹、水资源生态承载力分析表明，2005~2012 年水资源利用程度中等，2013~2014 年水资源利用程度明显增高，南疆、北疆水资源生态足迹、水资源承载力大于东疆，而南、北疆万元 GDP 水资源生态足迹则小于东疆，对保持现状条件进行 2015~2025 年预测，新疆水资源生态赤字仍将出现。贺可[7]等人利用 1972~2015 年 Landsat MSS/TM/OLI 及 CBERS 遥感影像数据，获取近 40 年新疆土地利用数据，结果表明，土地不断开垦、耕地面积不断扩大已到了相当数量规模，2000 年以来开垦耕地增加了 243.03 万 hm^2 ，现状耕地总量接近 900 万 hm^2 ，土地开垦撂荒成为新疆土地利用变化最重要特征。本文基于水资源总量控制目标，综合考虑农业用水在用水总量占比、滴灌节水面积在总灌面积的占比、灌溉用水定额、灌溉水利用系数对水资源的影响及分析其灌溉水资源承载力，为新疆农业水资源有效利用与灌溉高质量协同发展提供支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

新疆占国土面积 1/6 远离海洋深居内陆腹地，位于 $73^{\circ}40' \sim 96^{\circ}23'E$ ， $34^{\circ}25' \sim 49^{\circ}10'N$ ，年均气温 10.4°C ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3819.1°C ，年均降水量 154.1 mm，年均蒸发量 2125.4 mm，干旱指数 10~15。具有“三山夹二盆”洪冲积平原、山间盆地谷地、荒漠戈壁多样性地理环境特征，降水稀少、蒸发强烈、气候干旱、生态脆弱，形成了我国最为典型的沙漠绿洲纯灌溉农业格局，灌溉水资源有效利用是农业经济发展支柱。截止 2018 年新疆地方系统（不含新疆生产建设兵团，下同）[8]已建水库 482 座，库容 124.35 亿 m^3 （大型 17 座库容 84.05 亿 m^3 ；中型 96 座库容 30.77 亿 m^3 ；小型 369 座库容 9.53 亿 m^3 ），库容水量占引用水总量 30%。已建水闸工程 25,310 座（大型 22 座；中型 226 座；小型 25,062 座）。各级渠系输水工程 17.76 万 km （其中防渗 8.16 万 km ，防渗率 46%），灌溉面积拥有防渗渠 16.3 m/hm^2 ，各级渠系输水量占引用水总量的 70%。2018 年新疆国民经济社会发展显示[9]，粮食、棉花、油料和糖类（甜菜）四类作物种植面积分别为 220.36、254.05、21.86 和 5.99 万 hm^2 ，平均单产 6930 kg/hm^2 、1965 kg/hm^2 、3045 kg/hm^2 、74,340 kg/hm^2 ；特色林果产量 1729.44 万 t（园林水果 1118.72 万 t；坚果 124.69 万 t；瓜类 486.03 万 t）。以新疆常住人口 2523.22 万人计，人均粮食、棉花、油料、糖类（甜菜）和林果拥有量为 605 kg、198 kg、26 kg、176 kg 和 685 kg；农业生产总值 1781.75 亿元，占比 13.1%，人均 54,280 元；人均综合用水量 1668 m^3 ，毛灌溉定额 7697 m^3/hm^2 。水资源总量多年平均 832 亿 m^3 占全国水资源[10]总量 27,462.5 亿 m^3 的 3.1%，2018 年农业用水 386.2 亿 m^3 占全国 3693.1 亿 m^3 的 10.5%，灌溉面积 501.72 万 hm^2 占全国 7400 万 hm^2 的 6.8%，养育着占国土 17% 的新疆各族人民共生发展。

2.2. 研究方法

基于农业水资源承载能力[11][12]“在一定水资源可利用量、农业用水技术水平，良好生态环境前提下，通过先进农业节水合理配水措施所能支持的区域极限农业灌溉土地面积”，农业水资源承载灌溉土地面积 $S_{\text{灌溉}}$ ，是规划目标年供水总量 $W_{\text{供水}}$ 、灌溉定额 $M_{\text{定额}}$ 、灌溉技术 $G_{\text{技术}}$ 、灌溉水利用系数 $\eta_{\text{灌溉}}$ 的函数：

$$S_{\text{灌溉}} = f(W_{\text{供水}}, M_{\text{定额}}, G_{\text{技术}}, \eta_{\text{灌溉}}) \quad (1)$$

式中，水资源农业供水 $W_{\text{供水}}$ ，按规划目标年水资源控制总量，以用水现状基准年供水总量农业用水占比等差递减计算农业用水量；灌溉定额 $M_{\text{定额}}$ ，数据源于各县 1950~2018 年气象站点气象资料、新疆农业用水定额技术研究应用[13]、新疆 2013~2018 滴灌作物需水量与灌溉制度试验研究成果汇编[14]，中科院资源环境科学数据中心关于新疆地理土壤分布信息，综合考虑灌区地理区位气候、土壤、作物需水有效降水响应计算分析。参考作物蒸腾量 ET_0 采用彭曼-蒙特斯(P-M)分析[15]：

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

式中, Δ 为温度~饱和水汽压关系曲线在 T 处的切线斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; R_n 为净辐射, $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$; γ 为湿度表常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; T 为平均气温, $^\circ\text{C}$; u_2 为2 m高水平处风速, m/s ; e_a 为饱和水汽压, kPa ; e_d 为实际水汽压, kPa 。

作物用水量 ET 按下式分析:

$$ET = ET_0 \cdot K_C - P_0 \quad (3)$$

式中, ET 为作物用水量, mm ; ET_0 为参考作物蒸腾量, mm ; K_C 为作物系数; P_0 为有效降水量, mm 。

式(3)中 K_C 为作物生长期需水量与参考作物蒸腾量比值, 由下式计算:

$$K_C = \sum_{i=1}^n ET_i / ET_{0i} \quad (4)$$

式中, i 为作物生长的第 i 阶段; n 为作物生长阶段数目; ET_i 为作物生长 i 阶段需水量, mm ; ET_{0i} 为作物生长 i 阶段参考蒸腾量, mm 。

式(3)中 P_0 由下式计算分析:

$$P_0 = 10\gamma H (\theta_2 - \theta_1) + (ET_d - K_d) t \quad (5)$$

式中, P_0 为有效降雨量, mm ; γ 为土壤干容重, g/cm^3 ; H 为根系吸水层深度, cm ; t 为前后两次测定土壤含水率相隔时间, d ; ET_d 为时段内日均蒸腾量, mm/d ; K_d 为 t 时段内日均地下水有效补给量, mm/d ; θ_1 、 θ_2 为降雨前、后测得土壤重量含水率, %。降水量 P 与有效降水量关系为 $P_0 = Pa$, 新疆南疆 $a = 0.35$; 北疆 $a = 0.52$; 全疆 $a = 0.41$ [13]。

考虑土壤质地地理区位对灌溉定额影响, 采用地理区位及质地分布加权分析:

$$M_{\text{加权}} = \frac{ET(K_{1i} + K_{2j})}{2} \quad (6)$$

$$K_{1i} = \sum_{i=1}^n ET a_i \quad (7)$$

$$K_{2j} = \sum_{j=1}^n ET a_j \quad (8)$$

式中, $M_{\text{加权}}$ 为考虑质地地理区位影响的灌溉定额, mm ; ET 为作物需水量, mm ; K_{1i} 为不同土壤质地调节系数, 下标 i 为粘土质、粉砂土、沙土质; K_{2j} 为不同地理区位调节系数, 下标 j 为前山带、平原带、盆地区; a_{ij} 分别为不同土壤质地、地理区位分布面积, hm^2 。

不同灌溉模式面积及灌溉定额加权灌区综合田间灌溉定额:

$$M_{\text{综合田间}} = \frac{\sum m_i A_i}{\sum A_i} \quad (9)$$

式中: A_i 为不同灌溉模式(常规灌溉、膜上灌、喷灌、微灌)面积, hm^2 , m 为不同灌溉模式田间灌溉定额, m^3/hm^2 。

灌溉水利用系数 $\eta_{\text{灌溉}}$, 以现状年为基准, 在预期目标年之间进行等比值计算:

$$\eta_{\text{灌溉}} = \eta_{\text{现状}} P_i \quad (10)$$

$$p_i = \eta_{\text{目标}} / \eta_{\text{现状}} \quad (11)$$

式中： $\eta_{\text{目标}}$ 为目标年灌溉水利用系数； $\eta_{\text{现状}}$ 为基准现状年灌溉水利用系数； p_i 为灌溉水利用系数现状与目标之间提高系数。

农业水资源承载灌溉土地面积 $S_{\text{灌溉}}$ ，综上水资源总量控制下农业供水可灌面积：

$$S_{\text{灌溉}} = W_{\text{供水}} \eta_{\text{灌溉}} / M_{\text{综合田间}} \quad (12)$$

本研究数据处理分析采用 Excel 2003 系统。

3. 结果与分析

3.1. 灌溉水资源量分析

新疆水资源利用刚性约束 2030 年用水总量控制[16] [17]指标 526.7 亿 m^3 ，以 2018 年供水总量农业用水占比为基准，按 2% 占比等差递减地方系统农业水资源量如表 1 所示，可以看出，2030 年新疆用水总量 526.7 亿 m^3 控制指标，其中地方系统 379.29 亿 m^3 左右。地方系统现状 2018 年农业用水 386.20 亿 m^3 ，占比 91.8%。供水总量 379.29 亿 m^3 条件下，占比 90.0% 的农业用水量 339.79 亿 m^3 ；占比 86.4% 时的农业用水量 326.20 亿 m^3 ；占比 81.2% 时的农业用水量 306.63 亿 m^3 ；占比 74.7% 时的农业用水量 282.10 亿 m^3 。分析表明，水资源

Table 1. Agricultural water supply of local system in Xinjiang (100 million m^3)
表 1. 新疆地方系统农业供水量(亿 m^3)

灌区	2018 年现状统计			2030 年供水 总量控制	农业用水占供水总量 2% 等额递减							
	供水总量	农业 用水	占供水 总量%		农业用水	占供水 总量%	农业用水	占供水 总量%	农业用水	占供水 总量%	农业用水	占供水 总量%
和田	41.13	38.40	93.4	38.77	35.49	91.5	34.07	87.9	32.02	82.6	29.46	76.0
喀什	91.84	88.47	96.3	79.81	75.32	94.4	72.31	90.6	67.97	85.2	62.53	78.4
克州	10.75	9.98	92.8	10.23	9.30	90.9	8.93	87.3	8.40	82.1	7.72	75.5
阿克苏	81.43	78.50	96.4	67.53	63.80	94.5	61.25	90.7	57.57	85.3	52.96	78.4
巴州	36.39	31.93	87.7	36.77	31.60	85.9	30.34	82.5	28.52	77.6	26.24	71.4
吐鲁番	12.26	10.73	87.5	10.44	8.95	85.8	8.59	82.3	8.08	77.4	7.43	71.2
哈密	7.18	5.70	79.4	6.53	5.08	77.8	4.88	74.7	4.59	70.2	4.22	64.6
乌鲁木齐	5.55	3.74	67.3	1.67	1.10	66.0	1.06	63.3	0.99	59.5	0.91	54.8
昌吉州	27.74	24.13	87.0	22.49	19.17	85.3	18.41	81.8	17.30	76.9	15.92	70.8
博州	10.13	9.36	92.4	9.45	8.56	90.6	8.21	86.9	7.72	81.7	7.10	75.2
塔城	20.38	18.47	90.6	16.57	14.71	88.8	14.12	85.2	13.28	80.1	12.21	73.7
伊犁州	45.10	39.65	87.9	45.10	38.85	86.1	37.30	82.7	35.06	77.7	32.25	71.5
阿勒泰	26.28	25.06	95.4	26.28	24.57	93.5	23.59	89.8	22.17	84.4	20.40	77.6
克拉玛依	4.75	2.08	43.8	7.65	3.28	42.9	3.15	41.2	2.96	38.7	2.73	35.6
北疆	139.93	122.49	87.5	129.21	110.25	85.8	105.84	82.3	99.49	77.4	91.53	71.2
东疆	19.44	16.43	84.5	16.97	14.03	82.8	13.47	79.5	12.66	74.7	11.65	68.7
南疆	261.54	247.28	94.5	233.11	215.51	92.6	206.89	88.9	194.48	83.6	178.92	76.9
全疆	420.91	386.20	91.8	379.29	339.79	90.0	326.20	86.4	306.63	81.2	282.10	74.7

总量控制目标下, 随着经济社会用水结构调整引起农业用水占比下降, 农业用水负增长和水资源节约高效利用尤显突出。

3.2. 农业用水田间灌溉定额分析

以新疆 86 个县域灌区 30 种大田作物灌溉用水为研究对象, 采用式(1)~(8)综合分析得 14 个地州灌区不同灌溉模式田间灌溉定额(表 2)看出, 常规灌田间灌溉定额 $5085 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 膜上灌田间灌溉定额 $4530 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 喷灌田间灌溉定额 $4035 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 滴灌田间灌溉定额 $3720 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。不同灌区灌溉模式灌溉定额大小呈现东疆 > 南疆 > 北疆灌区基本规律, 与灌区地理生境区位、有效降水气象水文、植物水分蒸散及作物需水特征吻合。

Table 2. Field irrigation quota of different irrigation modes in Xinjiang irrigation district

表 2. 新疆灌区不同灌溉模式田间灌溉定额

灌区	常规灌(m^3/hm^2)	膜上灌(m^3/hm^2)	喷灌(m^3/hm^2)	滴灌(m^3/hm^2)
和田	5205	4680	4185	3810
喀什	5130	4590	4110	3750
克州	5085	4560	4065	3720
阿克苏	5175	4650	4155	3810
巴州	5190	4605	4125	3795
吐鲁番	6825	6000	5370	4980
哈密	4920	4320	3855	3585
乌鲁木齐	5550	4920	4395	4050
昌吉州	4845	4380	3840	3540
博州	4935	4395	3915	3600
塔城	4725	4140	3720	3450
伊犁州	4815	4305	3840	3510
阿勒泰	4755	4185	3735	3480
克拉玛依	5325	4695	4185	3885
北疆	4995	4440	3945	3645
东疆	5865	5160	4620	4290
南疆	5160	4620	4125	3780
全疆	5085	4530	4035	3720

为获取灌区不同灌溉模式综合田间灌溉定额, 以 2018 年水利统计总灌面积滴灌面积占比 48.5%为基准, 在此基础上, 滴灌面积占比分别提高到 52.6%、60.4%、77.3%和 86.2%, 利用不同灌溉模式田间灌溉定额及其面积, 由式(9)加权平均得灌区综合田间灌溉定额, 如表 3 所示。由结果看出, 灌区 2018 年滴灌面积占比 48.5%时, 综合田间灌溉定额 $4170 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、滴灌面积占比 52.6%时, 综合田间灌溉定额 $4305 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、滴灌面积占比 60.4%时, 综合田间灌溉定额 $4200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、滴灌面积占比 77.3%时, 综合田间灌溉定额 $3975 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、滴灌面积占比 86.2%时, 综合田间灌溉定额 $3870 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。分析表明, 随着滴灌面积占比增加, 综合田间灌溉定额逐步下降并接近滴灌田间灌溉定额, 这有利于水资源高效利用和节水增效。

Table 3. Comprehensive field irrigation quota of Xinjiang irrigation district (m^3/hm^2)
表 3. 新疆灌区综合田间灌溉定额(m^3/hm^2)

灌区	2018 滴灌面积占比 48.5%	滴灌面积占比 52.6%	滴灌面积占比 60.4%	滴灌面积占比 77.3%	滴灌面积占比 86.2%
和田	5115	4695	4590	4335	4110
喀什	4995	4770	4680	4275	4065
克州	5265	4830	4770	4320	3915
阿克苏	5025	4470	4335	4020	3930
巴州	4515	4080	3990	3900	3855
吐鲁番	5490	5955	5820	5370	5175
哈密	3585	3975	3840	3750	3690
乌鲁木齐	4425	5325	5250	4740	4350
昌吉州	3045	3750	3645	3585	3585
博州	3870	3795	3705	3645	3645
塔城	1950	3660	3585	3525	3510
伊犁州	3705	4230	4065	3810	3690
阿勒泰	4620	3825	3750	3630	3555
克拉玛依	4260	4035	3900	3900	3900
北疆	3240	4035	3930	3795	3735
东疆	4605	4950	4815	4560	4440
南疆	4950	4545	4455	4140	3990
全疆	4170	4305	4200	3975	3870

3.3. 灌溉水利用系数分析

以 2018 年灌溉水利用系数 0.542 为基准, 2020 年实现 0.570, 2025 年预期由 0.570 提升到 0.600 提高 5.26%, 2030 年预期由 0.600 提升到 0.630 提高 5.00%, 2035 年预期由 0.630 提升到 0.650 提高 3.17%, 努力实现新疆灌区综合灌溉水利用系数 0.650 (中型灌区不低于 0.60, 微灌工程近于 0.85) [18] 目标。由此得不同灌溉水利用系数及毛灌溉定额如表 4 所示, 由分析结果看出, 新疆灌区 2020 年, 实现毛灌溉定额 $7560 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉水利用系数需达到 0.570; 灌区 2025 年, 预期毛灌溉定额减少到 $7005 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉水利用系数需提升至 0.600; 灌区 2030 年, 预期毛灌溉定额减少至 $6315 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉水利用系数需提升至 0.630; 灌区远景 2035 年, 预期毛灌溉定额下降至 $5955 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉水利用系数需提升至 0.650。由此可见, 随着灌溉水利用系数提升, 毛灌溉定额呈逐步下降状态, 但由于灌溉水利用系数趋近上限值, 毛灌溉定额下降空间十分有限。

3.4. 农业用水承载灌溉能力分析

由表 1~4 参数, 以式(12)得影响因素与农业用水承载灌溉面积(表 5)成果, 并由此建立 W 、 N 、 D 、 M 、 η 与 S 多元回归方程式(13), 经拟合方程 R 、 F 均为极显著。

$$S = 58.8595 + 1.2375W + 0.1077N - 0.0206D - 0.0059M - 33.3210\eta \quad (13)$$

$$\left[R_{(70-2,0.01)} = 0.980^{**} > R_{(70-2,0.01)} = 0.325; F_{(70,0.01)} = 334.73^{**} > F_{(70,0.01)} = 2.37 \right]$$

由式(13)看出,灌溉水资源可承载灌溉面积 S ,与农业用水量 W 、供水总量农业用水占比 N 成正比,与总灌面积滴灌面积占比 D 、毛灌溉定额 M 、灌溉水利用系数 η 成反比,对水资源承载灌溉面积影响大小顺序: $W > N > D > M > \eta$,表明影响承载灌溉面积多因素中农业水量最为明显。由此,灌区 S 与 W 之间存在关系如图 1 所示,经拟合北疆、东疆、南疆灌区回归方程如下:

$$S_{\text{北疆灌区}} = 0.0268W^2 - 10.374W + 1099.30 \quad (14)$$

$$\left(R_{(5-2,0.01)} = 0.993^{**} > R_{(5-2,0.01)} = 0.959 \right)$$

$$S_{\text{东疆灌区}} = 0.7133W^2 - 28.982W + 306.73 \quad (15)$$

$$\left(R_{(9-2,0.01)} = 0.949^* > R_{(5-2,0.01)} = 0.878 \right)$$

$$S_{\text{南疆灌区}} = 0.1141W^2 - 62.594W + 8774.80 \quad (16)$$

$$\left(R_{(9-2,0.01)} = 0.878^* > R_{(5-2,0.01)} = 0.878 \right)$$

Table 4. Irrigation water utilization coefficient and gross irrigation quota (m^3/hm^2)
表 4. 灌溉水利用系数及毛灌溉定额(m^3/hm^2)

灌区	2018 年现状 $\eta_{\text{灌溉}} = 0.542$			2020 年实现 $\eta_{\text{灌溉}} = 0.570$			2025 年预期 $\eta_{\text{灌溉}} = 0.600$			2030 年预期 $\eta_{\text{灌溉}} = 0.630$			2035 年预期 $\eta_{\text{灌溉}} = 0.650$		
	$M_{\text{毛}}$	$\eta_{\text{灌溉}}$	$M_{\text{田}}$	$M_{\text{毛}}$	$\eta_{\text{灌溉}}$	$M_{\text{田}}$	$M_{\text{毛}}$	$\eta_{\text{灌溉}}$	$M_{\text{田}}$	$M_{\text{毛}}$	$\eta_{\text{灌溉}}$	$M_{\text{田}}$	$M_{\text{毛}}$	$\eta_{\text{灌溉}}$	$M_{\text{田}}$
和田	10500	0.487	5115	9135	0.512	4680	8520	0.539	4590	7635	0.566	4320	7035	0.584	4110
喀什	10230	0.489	4995	9270	0.514	4770	8640	0.541	4680	7515	0.568	4275	6915	0.586	4065
克州	10680	0.493	5265	9255	0.518	4800	8715	0.546	4755	7515	0.573	4305	6630	0.591	3915
阿克苏	9390	0.535	5025	7950	0.563	4470	7320	0.592	4335	6465	0.622	4020	6120	0.642	3930
巴州	8325	0.542	4515	7155	0.570	4080	6645	0.600	3990	6180	0.630	3900	5925	0.650	3855
吐鲁番	8895	0.618	5490	9165	0.650	5955	8505	0.684	5820	7470	0.718	5370	6975	0.741	5175
哈密	5355	0.669	3585	5655	0.704	3975	5190	0.741	3840	4845	0.778	3765	4605	0.802	3690
乌鲁木齐	7680	0.577	4425	8775	0.607	5325	8220	0.639	5250	7080	0.671	4740	6285	0.692	4350
昌吉州	4380	0.696	3045	5130	0.732	3750	4725	0.770	3645	4440	0.809	3600	4290	0.835	3585
博州	6030	0.641	3870	5625	0.674	3795	5220	0.710	3705	4890	0.745	3645	4740	0.769	3645
塔城	3120	0.626	1950	5565	0.658	3660	5175	0.693	3585	4845	0.728	3525	4665	0.751	3510
伊犁州	6900	0.536	3705	7500	0.564	4230	6855	0.593	4065	6105	0.623	3810	5730	0.643	3690
阿勒泰	8580	0.538	4620	6765	0.566	3825	6300	0.596	3750	5805	0.625	3630	5505	0.645	3555
克拉玛依	6375	0.669	4260	5730	0.704	4035	5265	0.741	3900	4995	0.778	3885	4860	0.802	3900
北疆	5460	0.593	3240	6465	0.624	4035	5985	0.656	3930	5505	0.689	3795	5250	0.711	3735
东疆	7245	0.636	4605	7395	0.669	4950	6840	0.704	4815	6165	0.739	4560	5820	0.763	4440
南疆	9720	0.510	4950	8475	0.536	4545	7890	0.565	4455	6975	0.593	4140	6510	0.612	3990
全疆	7695	0.542	4170	7560	0.570	4305	7005	0.600	4200	6315	0.630	3975	5955	0.650	3870

注: $M_{\text{毛}}$ 为毛灌溉定额; $\eta_{\text{灌溉}}$ 为灌溉水利用系数; $M_{\text{田}}$ 为综合田间灌溉定额。

Table 5. Total control area of agricultural water resources and its influencing factors

表 5. 农业水资源总量控制可承载灌溉面积及影响因素

(a)

灌区	可灌面积万 hm^2	2018 年现状				
		农业用水量亿 m^3	农业用水占比%	滴灌面积占比%	毛灌溉定额 (m^3/hm^2)	灌溉水利用系数
代码	<i>S</i>	<i>W</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	η
和田	36.57	38.40	93.4	24.7	10500	0.487
喀什	86.48	88.47	96.3	22.3	10230	0.489
克州	9.34	9.98	92.8	11.6	10680	0.493
阿克苏	83.60	78.50	96.4	43.3	9390	0.535
巴州	38.35	31.93	87.7	71.3	8325	0.542
吐鲁番	12.06	10.73	87.5	34.3	8895	0.618
哈密	10.64	5.70	79.4	55.3	5355	0.669
乌鲁木齐	4.87	3.74	67.3	12.2	7680	0.577
昌吉州	55.09	24.13	87.0	77.1	4380	0.696
博州	15.52	9.36	92.4	76.5	6030	0.641
塔城	59.20	18.47	90.6	78.6	3120	0.626
伊犁州	57.46	39.65	87.9	31.7	6900	0.536
阿勒泰	29.21	25.06	95.4	60.9	8580	0.538
克拉玛依	3.26	2.08	43.8	81.2	6375	0.669
北疆	224.62	122.49	87.5	62.4	5460	0.593
东疆	22.71	16.43	84.5	44.2	7245	0.636
南疆	254.35	247.28	94.5	36.5	9720	0.510
全疆	501.67	386.20	91.8	48.5	7695	0.542

(b)

灌区	可灌面积/万 hm^2	2020 年实现				
		农业用水量亿 m^3	农业用水占比%	滴灌面积占比%	毛灌溉定额(m^3/hm^2)	灌溉水利用系数
代码	<i>S</i>	<i>W</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	η
和田	38.85	35.49	91.5	27.2	9135	0.512
喀什	81.25	75.32	94.4	24.6	9270	0.514
克州	10.05	9.30	90.9	12.8	9255	0.518
阿克苏	80.25	63.80	94.5	47.5	7950	0.563
巴州	44.16	31.60	85.9	75.8	7155	0.570
吐鲁番	9.77	8.95	85.8	37.8	9165	0.650
哈密	8.98	5.08	77.8	60.8	5655	0.704
乌鲁木齐	1.25	1.10	66.0	13.8	8775	0.607
昌吉州	37.37	19.17	85.3	83.7	5130	0.732
博州	15.22	8.56	90.6	84.1	5625	0.674
塔城	26.43	14.71	88.8	83.8	5565	0.658
伊犁州	51.80	38.85	86.1	34.9	7500	0.564
阿勒泰	36.32	24.57	93.5	66.5	6765	0.566
克拉玛依	5.72	3.28	42.9	89.3	5730	0.704
北疆	174.12	110.25	85.8	67.6	6465	0.624

Continued

东疆	18.75	14.03	82.8	48.6	7395	0.669
南疆	254.57	215.51	92.6	39.8	8475	0.536
全疆	447.43	339.79	90.0	52.6	7560	0.570

(c)

灌区	可灌面积/万 hm^2	2025 年预期					
		农业用水量亿 m^3	农业用水占比%	滴灌面积占比%	毛灌溉定额(m^3/hm^2)	灌溉水利用系数	
代码	<i>S</i>	<i>W</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	η	
和田	39.99	34.07	87.9	34.0	8520	0.539	
喀什	83.69	72.31	90.6	30.7	8640	0.541	
克州	10.25	8.93	87.3	16.9	8715	0.546	
阿克苏	83.67	61.25	90.7	56.8	7320	0.592	
巴州	45.66	30.34	82.5	83.0	6645	0.600	
吐鲁番	10.10	8.59	82.3	45.3	8505	0.684	
哈密	9.40	4.88	74.7	73.0	5190	0.741	
乌鲁木齐	1.29	1.06	63.3	19.4	8220	0.639	
昌吉州	38.96	18.41	81.8	91.2	4725	0.770	
博州	15.73	8.21	86.9	91.1	5220	0.710	
塔城	27.29	14.12	85.2	89.7	5175	0.693	
伊犁州	54.41	37.30	82.7	46.6	6855	0.593	
阿勒泰	37.44	23.59	89.8	72.7	6300	0.596	
克拉玛依	5.98	3.15	41.2	98.3	5265	0.741	
北疆	181.11	105.84	82.3	75.5	5985	0.656	
东疆	19.50	13.47	79.5	58.3	6840	0.704	
南疆	263.26	206.89	88.9	47.1	7890	0.565	
全疆	463.87	326.20	86.4	60.4	7005	0.600	

(d)

灌区	可灌面积万 hm^2	2030 年预期					
		农业用水量亿 m^3	农业用水占比%	滴灌面积占比%	毛灌溉定额(m^3/hm^2)	灌溉水利用系数	
代码	<i>S</i>	<i>W</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	η	
和田	41.94	32.02	82.6	53.0	7635	0.566	
喀什	90.45	67.97	85.2	60.6	7515	0.568	
克州	11.18	8.40	82.1	50.4	7515	0.573	
阿克苏	89.05	57.57	85.3	80.2	6465	0.622	
巴州	46.15	28.52	77.6	90.6	6180	0.630	
吐鲁番	10.82	8.08	77.4	69.9	7470	0.718	
哈密	9.47	4.59	70.2	82.5	4845	0.778	
乌鲁木齐	1.40	0.99	59.5	52.9	7080	0.671	
昌吉州	38.96	17.30	76.9	95.3	4440	0.809	
博州	15.79	7.72	81.7	95.5	4890	0.745	
塔城	27.41	13.28	80.1	94.0	4845	0.728	

Continued

伊犁州	57.43	35.06	77.7	68.3	6105	0.623
阿勒泰	38.19	22.17	84.4	82.6	5805	0.625
克拉玛依	5.93	2.96	38.7	98.3	4995	0.778
北疆	185.10	99.49	77.4	85.5	5505	0.689
东疆	20.29	12.66	74.7	75.8	6165	0.739
南疆	278.76	194.48	83.6	70.1	6975	0.593
全疆	484.15	306.63	81.2	77.3	6315	0.630

(e)

灌区	可灌面积万 hm^2	2035 年预期					灌溉水利用系数
		农业用水量亿 m^3	农业用水占比%	滴灌面积占比%	毛灌溉定额(m^3/hm^2)		
代码	S	W	N	D	M	η	
和田	41.88	29.46	76.0	69.8	7035	0.584	
喀什	90.43	62.53	78.4	75.9	6915	0.586	
克州	11.64	7.72	75.5	80.7	6630	0.591	
阿克苏	86.54	52.96	78.4	88.2	6120	0.642	
巴州	44.29	26.24	71.4	93.8	5925	0.650	
吐鲁番	10.65	7.43	71.2	83.8	6975	0.741	
哈密	9.16	4.22	64.6	88.1	4605	0.802	
乌鲁木齐	1.45	0.91	54.8	79.3	6285	0.692	
昌吉州	37.11	15.92	70.8	96.0	4290	0.835	
博州	14.98	7.10	75.2	96.4	4740	0.769	
塔城	26.17	12.21	73.7	95.7	4665	0.751	
伊犁州	56.28	32.25	71.5	81.2	5730	0.643	
阿勒泰	37.06	20.40	77.6	90.1	5505	0.645	
克拉玛依	5.62	2.73	35.6	98.3	4860	0.802	
北疆	178.67	91.53	71.2	91.1	5250	0.711	
东疆	19.82	11.65	68.7	85.8	5820	0.763	
南疆	274.77	178.92	76.9	81.9	6510	0.612	
全疆	473.26	282.10	74.7	86.2	5955	0.650	

拟合方程相关性具有显著和极显著水平代表性。对式(15)~(16)一阶求导得北疆、东疆、南疆水资源极限承载灌溉面积为 193.54 万 hm^2 、20.32 万 hm^2 、274.29 万 hm^2 ，整体合计 488.15 万 hm^2 。

4. 讨论

在农业供水量有限情形下，毛灌溉定额和灌溉水利用系数及滴灌面积占比，直接影响灌溉面积承载能力。基于最严格水资总量控制目标，预期分析 2035 年地方系统农业用水总量 282.10 亿 m^3 ，在农业用水占比 74.7%，高效滴灌节水面积占比 86.2%，毛灌溉定额 5955 m^3/hm^2 ，灌溉水利用系数 0.650 时，可承载 488.15 万 hm^2 灌溉土地面积，由此水资源总量控制减水减地，比 2018 灌溉面积减少 13.52 万 hm^2 。

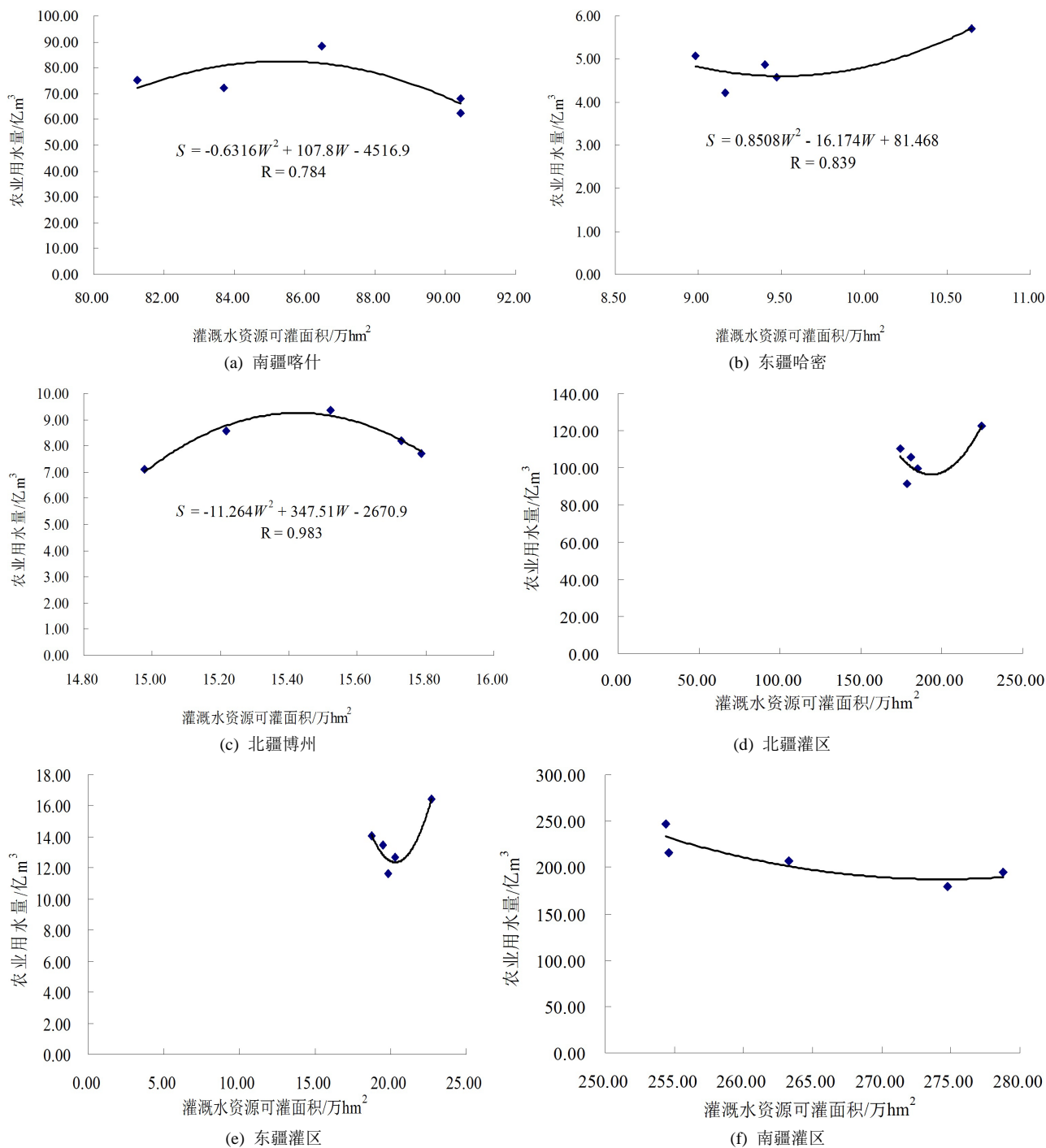


Figure 1. Relationship between irrigation area S and irrigation water utilization coefficient W

图 1. 灌溉面积 S 与灌溉水利用系数 W 关系

5. 结论

新疆地方系统在有限的农业用水预期 282.10 亿 m^3 时, 通过规模化滴灌节水技术、提升灌溉水利用系数, 可有效降低灌溉用水定额, 可承载极限灌溉面积为 488.15 万 hm^2 , 其中北疆、东疆、南疆灌区承载灌溉面积分别为 193.54 万 hm^2 、20.32 万 hm^2 、274.29 万 hm^2 。

基金项目

新疆水利科技专项(YF2020-01)。

参考文献

- [1] 张羽威, 张昊哲. 新疆经济发展与水资源利用空间关联性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2018(2): 129-134.
ZHANG Yuwei, ZHANG Haozhe. Spatial correlation between economic development and water resources utilization in Xinjiang. *Journal of Harbin Institute of Technology (Social Science Edition)*, 2018(2): 129-134. (in Chinese)
- [2] 杜根, 王保乾. 干旱区绿洲全要素农业水资源利用效率时空分异研究——以新疆为例[J]. 水利经济, 2017(2): 47-52.
DU Gen, WANG Baoqian. Spatiotemporal differentiation of total factor agricultural water resources utilization efficiency in oasis of arid area: A case study of Xinjiang. *Water Conservancy Economy*, 2017(2): 47-52. (in Chinese)
- [3] 周和平, 翟超, 孙志锋, 等. 新疆水资源综合利用效果及发展变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016(1): 95-100.
ZHOU Heping, ZHAI Chao, SUN Zhifeng, *et al.* Analysis on comprehensive utilization effect and development change of water resources in Xinjiang. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2016(1): 95-100. (in Chinese)
- [4] 张振龙, 孙慧. 新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联——基于 VAR 模型[J]. 生态学报, 2017(16): 5273-5284.
ZHANG Zhenlong, SUN Hui. Dynamic correlation of regional water resources on industrial ecosystem and economic growth in Xinjiang Based on VAR model. *Acta Ecologica Sinica*, 2017(16): 5273-5284. (in Chinese)
- [5] 胡宝华, 晁伟鹏, 喻晓玲. 干旱区水资源承载力空间布局研究——以新疆为例[J]. 资源开发与市场, 2018(8): 1093-1098.
HU Baohua, CHAO Weipeng and YU Xiaoling. Study on spatial distribution of water resources carrying capacity in arid areas: A case study of Xinjiang. *Resource Development and Market*, 2018(8): 1093-1098. (in Chinese)
- [6] 雷亚君, 张永福, 张敏惠, 等. 新疆水资源生态足迹核算与预测[J]. 干旱地区农业研究, 2017(5): 142-150.
LEI Yajun, ZHANG Yongfu, ZHANG Minhui, *et al.* Calculation and prediction of ecological footprint of water resources in Xinjiang. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2017(5): 142-150. (in Chinese)
- [7] 贺可, 吴世新, 杨怡, 等. 近 40a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理, 2018(6): 1333-1340.
HE Ke, WU Shixin, YANG Yi, *et al.* Dynamic change of land use and oasis in Xinjiang in recent 40 years. *Geography of Arid Area*, 2018(6): 1333-1340. (in Chinese)
- [8] 新疆维吾尔自治区水利厅. 新疆水利统计资料汇编, 2018 [Z].
Department of Water Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Compilation of Xinjiang Water Conservancy Statistics*, 2018. (in Chinese)
- [9] 新疆维吾尔自治区统计局编. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
Bureau of Statistics of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Xinjiang statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2018. (in Chinese)
- [10] 水利部. 中国水资源公报[R], 2018.
Ministry of Water Resources. *China Water Resources Bulletin*, 2018. (in Chinese)
- [11] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
FENG Shangyou. *Introduction to sustainable utilization and management of water resources*. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 杜守建, 崔振才. 区域水资源优化配置与利用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009: 48-51.
DU Shoujian, CUI Zhencai. *Optimal allocation and utilization of regional water resources*. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2009: 48-51. (in Chinese)
- [13] 王忠, 周和平, 张江辉. 新疆农业用水定额技术研究应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012.
WANG Zhong, ZHOU Heping and ZHANG Jianghui. *Research and application of agricultural water quota technology in Xinjiang*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 新疆水利管理总站. 新疆 2013-2018 滴灌作物需水量与灌溉制度试验研究成果汇编[R], 2019.
Xinjiang Water Conservancy Management Station. *Compilation of experimental research results on drip irrigation crop water demand and irrigation schedule in Xinjiang from 2013 to 2018*, 2019. (in Chinese)
- [15] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
DUAN Aiwan, SUN Jingsheng, LIU Yu, *et al.* *Irrigation water quota for main crops in northern China*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [16] 鄂竟平. 全国江河流域水资源管理现场会上报告[R], 2019.
E Jingping. *Report on national river basin water resources management field meeting*, 2019. (in Chinese)

- [17] 新疆水利厅. 新疆用水总量控制方案[R], 2017.
Xinjiang Water Resources Department. Total water consumption control scheme in Xinjiang, 2017. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 北京: 节水灌溉工程技术标准 GB/T50360-2018 [S].
北京: 中国水利水电出版社, 2018: 7-8.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Beijing: Technical standard for water saving irrigation engineering GB/T50360-2018. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2018: 7-8. (in Chinese)