

干旱区新疆滴灌用水定额研究应用

王 忠¹, 马铁成¹, 周和平^{2*}, 张太西³, 阿不来提·阿不都热依木¹, 马千雅¹

¹新疆维吾尔自治区灌溉排水发展中心, 新疆 乌鲁木齐

²新疆维吾尔自治区水利管理总站, 新疆 乌鲁木齐

³新疆维吾尔自治区气候中心, 新疆 乌鲁木齐

Email: *xjslzhp@126.com

收稿日期: 2021年1月8日; 录用日期: 2021年2月12日; 发布日期: 2021年2月19日

摘 要

滴灌高效节水技术已在干旱区新疆大面积推广应用, 研究分析滴灌用水定额技术指标, 对于实施严格的水资源总量控制定额管理具有重要作用。本文采用彭曼方法作物系数法和滴灌试验方法分析, 综合考虑不同灌溉保证率、地理区位、气候土壤、有效降水对滴灌用水定额响应, 划分86个县域灌区5个一级40个二级灌溉分区, 构建9种粮食、12种经作、1种苜蓿牧草类、7种果类, 形成30种作物种类1623个滴灌用水定额值。研究结果表明, 北疆灌区50%和75%灌溉保证率, 滴灌田间用水定额365 mm和410 mm, 两者相差12.3%; 东疆灌区滴灌田间用水定额429 mm和491mm, 两者相差14.5%; 南疆灌区滴灌田间用水定额378 mm和428 mm, 两者相差13.2%。全疆滴灌田间用水定额372 mm和420 mm, 两者相差12.9%。滴灌田间用水定额变化呈现东疆 > 南疆 > 北疆规律, 与灌区地理环境区位有效降水气象水文蒸发、植物水分蒸散及需水变化特征一致。滴灌用水定额涵盖了灌区大田粮作、经作、蔬菜、果树、林地、牧草大宗类作物, 研究成果具有广泛应用性。

关键词

水资源利用, 干旱灌区, 滴灌用水定额, 研究应用

Research and Application of Water Quota for Drip Irrigation in Arid Area of Xinjiang

Zhong Wang¹, Tiecheng Ma¹, Heping Zhou^{2*}, Taixi Zhang³, Abulaiti Abdu Reyimu¹, Qianya Ma¹

¹Xinjiang Uygur Autonomous Region Irrigation and Drainage Development Center, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Management Station, Urumqi Xinjiang

³Xinjiang Uygur Autonomous Region Climate Center, Urumqi Xinjiang

Email: *xjslzhp@126.com

Received: Jan. 8th, 2021; accepted: Feb. 12th, 2021; published: Feb. 19th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 王忠, 马铁成, 周和平, 张太西, 阿不来提·阿不都热依木, 马千雅. 干旱区新疆滴灌用水定额研究应用[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(1): 78-94. DOI: 10.12677/aep.2021.111008

Abstract

Drip irrigation high-efficiency water-saving technology has been widely used in arid areas of Xinjiang. Research and analysis of drip irrigation water quota technical indicators plays an important role in the implementation of strict water resources total amount control quota management. In this paper, penman method, crop coefficient method and drip irrigation experiment method were used to analyze the response of different irrigation guarantee rate, geographical location, climate, soil and effective precipitation to drip irrigation water quota. Five primary and 40 secondary irrigation zones in 86 county irrigation areas were divided, and 9 kinds of grain, 12 kinds of crops, 1 kind of alfalfa forage and 7 kinds of fruit were constructed, forming 1623 drip irrigation water quota of 30 kinds of crops Amount. The results showed that the field water quota of drip irrigation was 365 mm and 410 mm with 50% and 75% irrigation assurance rate in North Xinjiang irrigation area, the difference was 12.3%; the field water quota of drip irrigation in East Xinjiang irrigation area was 429 mm and 491 mm, the difference was 14.5%; the field water quota of drip irrigation in South Xinjiang irrigation area was 378 mm and 428 mm, the difference was 13.2%. The field water quota of drip irrigation in Xinjiang was 372 mm and 420 mm, with a difference of 12.9%. The results showed that the variation of field water use quota of drip irrigation was in the order of eastern Xinjiang > Southern Xinjiang > Northern Xinjiang, which was consistent with the variation characteristics of effective precipitation, meteorological and hydrological evaporation, plant water evapotranspiration and water demand in the geographical environment of the irrigation area. The water quota of drip irrigation covers grain crops, economic crops, vegetables, fruit trees, woodland and forage crops, and the research results are widely used.

Keywords

Water Resources Utilization, Arid Irrigation Area, Drip Irrigation Water Quota, Research and Application

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

新疆占国土面积的 1/6, 位于[1] 73°40′~96°23′E, 34°25′~49°10′N, 远离海洋深居内陆, 具有“三山夹二盆”与洪冲积平原、山间盆地谷地、荒漠戈壁等多样性环境特征[2]。多年平均气温 10.4℃, ≥10℃多年平均积温 3335.4℃, 多年平均降水量 154.1 mm, 多年平均蒸发量 2125.4 mm, 干旱指数高达 10~15, 降水稀少、蒸发强烈、气候干旱、生态脆弱, 是我国典型的沙漠绿洲纯灌溉农业[3], 2016 年新疆引用水总量 565.4 亿 m³, 其中农业用水 527.7 亿 m³ 占比 93.3%, 灌溉统计单位面积用水量 40.5 m³/hm², 灌溉水利用系数 0.527 [4], 同年全国引用水总量 6040.2 亿 m³, 其中农业用水 3768.0 亿 m³ 占比 62.4%, 灌溉统计单位面积用水量 25.3 m³/hm², 灌溉水利用系数 0.542 [5]。可以看出, 新疆农业用水结构占比大用水量较高, 灌溉水利用系数较低, 水资源有效利用及节水潜力并存, 大力发展以滴灌为主要模式的农业高效节水势在必行。水利统计显示[6] [7], 截止 2018 年新疆农业高效节水 373 万 hm² 占总灌面积的 62.8%, 为水资源高效利用节约保护提供了工程保障。基于水资源“总量控制定额管理”滴灌用水定额研究应用尤为重要。近年国内科研院所在新疆一些试区, 开展了多种作物滴灌用水定额试验研究。不同试区滴灌

冬麦试验结果表明[8]-[26], 灌溉定额 3400~6000 m³/hm²。春麦滴灌试验灌溉定额结果[27]-[41]为 3000~5250m³/hm²。试区春玉米滴灌试验结果[42]-[50]范围 4500~5250 m³/hm²之间, 滴灌复播玉米[51] [52] [53]灌溉定额 4200~4800 m³/hm²。旱作水稻滴灌试验结果表明[54] [55] [56] [57]灌溉定额 10275~13350 m³/hm²。试区谷子滴灌试验结果[58] 3750~4500 m³/hm²。土豆滴灌试验[59] [60] [61]灌溉定额为 2250~4500 m³/hm²。大豆、油菜、葵花滴灌试验[62]-[72]灌溉定额分别为 2250~4200 m³/hm²、4500~5250 m³/hm²和 2250~4200 m³/hm²。棉花滴灌试验[73]-[80]灌溉定额为 3750~6000 m³/hm²。试区甜菜、打瓜、西瓜、甜瓜滴灌试验[81]-[90]灌溉定额分别为 3000~6000 m³/hm²、2250~4500 m³/hm²、3750~4500 m³/hm²、3150~5250 m³/hm²。胡萝卜、辣椒滴灌试验[91] [92] [93] [94]灌溉定额分别为 3000~4800 m³/hm²、4500~5625 m³/hm²。试区滴灌苜蓿试验结果[95] [96]灌溉定额为 5000~6000 m³/hm²。哈密、吐鲁番、昌吉阜康、伊宁和南疆于田试区, 滴灌葡萄灌溉定额试验结果[97]-[105]分别为 7200~7500 m³/hm²、7850~9000 m³/hm²、6000 m³/hm²、4650~5250 m³/hm²和 7500~7950 m³/hm²。阿克苏阿拉尔滴灌红枣和温宿滴灌核桃试验灌溉定额[106] [107] [108]分别为 5250~5400 m³/hm²和 6300~7500 m³/hm²。南疆阿克苏滴灌林地灌溉定额试验[109] [110]结果为 6150~9000 m³/hm²。本文在新疆农业灌溉用水定额地方标准应用实践基础上, 基于全疆灌溉分区和近年农业气象信息及多作物滴灌试验成果综合集成拓展研究, 构建干旱区滴灌用水定额应用技术指标, 为农业高效节水管理提供依据。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究区概况

新疆山脉与洪积冲积、山前平原、山间盆地相间, 以天山形成南疆、东疆和北疆格局, 水资源、水生环境、自然地貌、水文土壤、气象等差异较大。全疆 14 个地(州、市)及所属 89 个县(市)单位, 兵团 14 个师及 178 个团场均对应分布其间。鉴于农业灌溉区域性以 86 个县(市)级为覆盖全疆灌区研究对象, 由灌区地理区位、海拔高程、作物生长年积温和无霜期、降水蒸发、土壤类型质地等因素见表 1, 可以看出, 农业灌区降水少蒸发量大, 海拔、气温、积温、无霜期变化较大, 有 36 种土类分布[111], 其中有自然肥力较高黑钙土, 但灌区多以棕钙土、淡棕钙土、草甸土、棕漠土、绿洲灰棕漠土、盐土、沙土分布, 质地多以粉沙、沙壤、中轻壤质以及戈壁砾质土, 灌区尚未见团粒状结构良好土质, 由此, 干旱新疆农业生产和节水灌溉技术应用尤显重要。

Table 1. Physical Geography and agrometeorological soil elements of irrigation area in Xinjiang

表 1. 新疆县市灌区自然地理、农业气象土壤要素状况

地州	灌区	经、纬度		海拔/m	气温、积温/°C		无霜期/d	年降水/mm	年蒸发/mm	灌区主要土壤分布	
		E	N		年均	≥10				土类	质地
和田地区	8	88°39'~82°43'	36°52'~37°56'	1262.8~1427.0	10.4~12.6	4065.3~4360.9	210~230	18.1~52.1	2309.7~2824.0	棕漠土、绿洲灰棕漠土、盐土、沙土	粉沙、沙壤、中轻壤土
喀什地区	12	75°14'~78°34'	37°47'~39°48'	1116.5~3090.9	3.3~13.3	1506.9~4363.7	79~241	43.2~72.3	2013.0~2618.4	棕漠土、绿洲灰棕漠土、沙土	沙壤、中轻壤、粉壤
克州灌区	4	75°12'~78°27'	39°09'~40°56'	1297.9~3505.2	6.5~13.1	2434.7~4697.7	138~261	74.3~229.0	1712.4~2938.7	棕漠土、绿洲灰棕漠土、盐(次生)土	沙壤、中轻壤、重壤
阿克苏区	9	79°08'~82°57'	40°30'~41°47'	980.4~1395.6	7.8~11.6	3327.3~4378.8	162~248	45.1~117.3	1384.1~2871.9	棕漠土、绿洲灰棕漠土、盐(次生)土	多以砂壤、中壤土
巴州灌区	9	84°09'~88°10'	38°09'~43°02'	846.0~2458.0	6.2~1.8	2524.0~4353.9	167~235	23.1~195.1	1820.4~2777.5	棕漠土、绿洲灰棕漠土、盐(次生)土	多以砂壤、中壤土

Continued

吐鲁番区	3	88°38'~ 90°14'	42°48'~ 42°56'	1.0~ 977.8	11.3~ 14.4	4518.1~ 5391.3	263~ 295	8.0~ 25.2	2597.3~ 3403.9	灰漠土、灰(灌溉) 棕漠土、沙土	中壤、砾石 土质
哈密灌区	3	91°38'~ 95°08'	41°32'~ 44°12'	469.0~ 1728.6	2.0~ 10.0	1735.0~ 4178.3	101~ 279	12.0~ 243.9	1606.4~ 4401.3	灰漠土、灰(灌溉) 棕漠土、沙土	沙壤、中壤、 砾石土质
乌鲁木齐	3	86°37'~ 88°58'	42°45'~ 45°00'	600.3~ 935.0	5.0~ 8.0	3335.0~ 3547.5	170~ 181	235.1~ 200.1	2100.0~ 2171.8	灰漠土、灰(灌溉) 棕漠土、草甸土	轻壤、中壤、 砾石土质
克拉玛依	1	84°44'~ 86°01'	44°07'~ 46°08'	522.1~ 340.0	7.0~ 7.3	3500.3~ 3595.5	160~ 175	150.0~ 179.0	2129.6~ 2500.0	灰漠土、灰(灌溉) 棕漠土、沙土	轻壤、中壤、 戈壁砾石土
昌吉州	7	86°19'~ 90°32'	43°50'~ 45°22'	471.4~ 1650.1	2.4~ 7.3	1732.2~ 3561.3	123~ 174	127.6~ 318.7	1635.7~ 2350.0	灰漠土、灰(灌溉) 棕漠土、草甸土	轻壤、中壤、 少量重壤土
博州灌区	3	81°04'~ 82°54'	44°37'~ 44°59'	320.1~ 1133.0	3.8~ 7.7	2395.4~ 3582.5	138~ 174	102.2~ 222.7	1501.7~ 1563.3	灰漠土、灰(灌溉) 棕漠土、草甸土	轻壤、中壤、 少量重壤土
塔城灌区	7	82°56'~ 85°43'	44°03'~ 46°47'	291.0~ 1493.5	2.4~ 7.6	1688.0~ 3685.6	133~ 183	143.2~ 273.5	1225.8~ 2114.4	棕钙土、灌溉棕钙 土、草甸土	轻中壤、重 壤、砾质土
伊犁灌区	10	80°29'~ 83°18'	43°09'~ 44°14'	600.0~ 1848.6	3.0~ 9.5	1316.7~ 3534.0	100~ 179	220.1~ 507.6	1259.2~ 1887.0	淡栗钙土、旱作栗 钙土、草甸土	轻壤、中壤、 少量重壤土
阿勒泰区	7	85°52'~ 90°23'	46°40'~ 48°03'	475.6~ 1225.6	1.0~ 4.8	1983.9~ 3081.2	75~ 160	110.1~ 205.1	1371.2~ 2331.1	棕钙土、薄层淡棕 钙土、草甸土	轻中壤、戈 壁砾质土

2.2. 数据来源

本研究数据主要有：1) 各县级相关气象数据《新疆各县气象站农业气象统计资料汇编》(1950~2008年)，2009~2019年农业气象源于新疆气候中心提供；2) 各灌区不同作物种类种植面积单产及收获为《新疆统计年鉴 2018》(中国统计信息网)和《新疆 2018 年国民经济和社会发展统计公报》(新疆维吾尔自治区统计局网站)及《新疆农业用水定额技术研究应用》；3) 新疆区域性滴灌需水量及土壤类型、土壤质地、地貌类型为《新疆滴灌作物需水量与灌溉制度试验研究成果汇编》(2013~2018) [112]和中国科学院资源环境科学数据中心[113]相关地理区位空间分布信息。

2.3. 研究方法

基于水资源合理投入有效利用节约目标，综合考虑灌溉分区、灌溉保证率、地理区位(前山带、平原带、盆地区)、气候土壤(粘壤土、壤土质、沙土质)分布、作物需水及有效降水响应，研究分析灌区 30 种作物滴灌用水定额。

1) 作物需水量及作物用水响应，采用彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)式[114]：

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

式中， ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量，mm/d； Δ 为温度~饱和水汽压关系曲线在 T 处的切线斜率，kPa/°C； R_n 为净辐射，MJ/m²·d； G 为土壤热通量，MJ/m²·d； γ 为湿度表常数，kPa/°C； T 为平均气温，°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。式(1)参数较多为简化采用彭曼公式计算软件，利用当地平均气温、水气压、2 米高风速、日照时数参数计算 ET_0 。

作物用水响应表征为作物灌溉用水量 ET ，按下式分析：

$$ET = ET_0 \cdot K_C - P_0 \quad (2)$$

式中, ET 为作物用水量, mm; ET_0 为参考作物蒸发蒸腾量(植物水分蒸散量), mm; K_C 为作物系数; P_0 为有效降水量, mm。

$$K_C = \sum_{i=1}^n ET_i / ET_{0i} \quad (3)$$

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

$$P_0 = 10\gamma H(W_2 - W_1) + (ET_d - K_d)t \quad (4)$$

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 为时段内日均蒸发蒸腾量, mm/d; K_d 为 t 时段内日均地下水有效补给量, mm/d; W_1 、 W_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 $a = 0.41$ [115]。

2) 滴灌作物需水量分配, 遵循作物种类水分生理特征, 按不同作物水分需求分布法:

$$ET_{ci} = k_j \sum_{i=1}^n (ET_{ci}) / n \quad (5)$$

式中, ET_{ci} 为灌区分配第 i 种作物需水量, mm; k_j 为灌区 i 种作物需水量占作物种类需水量之和平均比例系数; i 为灌区 1, 2, 3, ..., n 种作物。

3) 同作物所处不同土壤质地地理区位, 灌溉用水定额有一定差异, 作物生长在粘壤土、壤土质、沙土质, 以及“前山带”、“平原带”、“盆地区”不同区位, 灌溉用水定额有增加现象。为此, 考虑土壤质地地理区位对灌溉用水定额影响, 采用系数面积分布加权法分析:

$$M_{\text{加权}} = M_0 K_{1i} K_{2j} \quad (6)$$

$$K_{1i} = \begin{cases} M_0 = 667\gamma_i H \beta \\ i = (1), (2), (3) \\ (1), (2), (3) = \text{粘壤土, 壤土质, 沙土质} \end{cases} \quad (7)$$

同时, 与(2)相比, 获得(1):(2):(3)比例系数:

$$1: (1)/(2): (3)/(2) \quad (8)$$

于是, 不同土壤质地灌溉用水定额为:

$$M_{\text{综}i} = \sum_{i=1}^n M_0 A_i \quad (9)$$

$$K_{2j} = \begin{cases} D_i = f(ET_0) \\ i = (1), (2), (3) \\ (1), (2), (3) = \text{前山带, 平原带, 盆地区} \end{cases} \quad (10)$$

同时, 与(2)相比, 获得 (1):(2):(3) 比例系数:

$$1: (1)/(2): (3)/(2) \quad (11)$$

于是, 不同地理区位灌溉用水定额为:

$$M_{\text{综}j} = \sum_{i=1}^n M_0 A_j \quad (12)$$

所以，灌区不同土壤质地地理区位灌溉用水定额加权为：

$$M_{\text{加权}} = (M_{\text{综}i} + M_{\text{综}j}) / 2 \quad (13)$$

式中， $M_{\text{加权}}$ 为灌区综合加权灌溉用水定额，mm； M_0 为基本灌溉用水定额，mm； K_{1i} 为灌区不同土壤质地调节系数，下标 i 为粘土质、粉砂土、沙土质类型； K_{2j} 为灌区不同地理区位调节系数，下标 j 为前山带、平原带、盆地区类型； γ 为土壤容重， t/m^3 ； H 为作物湿润层深度，m； β 为田间持水量，占干土重%； D_i 为不同地理区位作物 3~9 月蒸发蒸腾量，mm。

4) 滴灌用水定额以正常平水年 50%，偏早年 75%两种灌溉保证率分析：

$$P(\%) = [m / (n + 1)] \times 100 \quad (14)$$

式中， m 为计算较长系列用水定额由大到小排列序号数； n 为用水定额系列长度。

调查统计试验数据利用 Excel 2007 进行图表绘制分析。

3. 结果与分析

3.1. 滴灌作物种类

本研究分析滴灌共计 30 种大田作物：9 种粮食作物(冬麦、春麦、春玉米、夏玉米、水稻、谷子、土豆、大豆、薯类)；12 种经济作物(棉花、油菜、葵花、甜菜、蕃茄、葡萄、打瓜、西瓜、甜瓜、辣椒、胡萝卜、其它蔬菜)；1 种苜蓿牧草类；7 种果树类(苹果、红枣、核桃、梨树、无花果、枸杞、其它果树)；1 种林地类(防护林、生态林和苗圃)，涵盖了新疆灌区大田粮作、经作、蔬菜、果树、林地、牧草大宗类作物。

3.2. 滴灌作物系数

基于 86 个县级灌区 1952~2019 年 67 年长系列，作物生长期气温、水汽压、风速、日照、湿度、降水、蒸发和地理位置、高程等 36 万组数据，由式(1)得参考作物蒸发蒸腾量，采用式(2)参考联合国粮农组织“作物需水量计算”及灌溉工程管理手册[115]等作物系数计算需水量与滴灌用水实际差别较大。鉴于此，滴灌作物需水关键技术参数之滴灌作物系数，检索了近 10 年国内大专院校及科研院所，新疆区开展 19 种滴灌作物试验研究经归整，见表 2 所示。为使成果信息应用拓展，利用表 2 全生育期作物系数与影响的 11 项综合因子进行了逐步回归计算，分析结果表明，滴灌作物系数与作物种类 Z 、灌区高程 H 、平均气温 T 、年降水 P ，年蒸发 W ，3~9 月蒸发蒸腾 ET_0 相关性好，经多元线性模型拟合方程为：

$$\begin{cases} K_i = 1.643 + 0.094Z + 0.00003H + 0.0175T - 0.0008P - 0.00003W - 0.0018ET_0 \\ R = 0.743^{**} \geq [R_{0.05} = 0.232, R_{0.01} = 0.302], n = 77 \\ F = 14.37^{**} \geq [F_{0.05} = 2.25, F_{0.01} = 3.12], n = 77 \\ F = 14.37^{**} \geq [F_{0.05} = 2.25, F_{0.01} = 3.12], n = 77 \end{cases} \quad (15)$$

式中： K_i 为滴灌作物系数， $i = 1, 2, 3$ 分别为单子叶、双子叶和果树类滴灌作物系数。

式(15)统计检验达到极显著水平代表性好。因此，各灌区作物全生育期单、双子叶滴灌作物系数可以量化给出，对于滴灌水稻作物系数，可据灌区蒸发、降水等气象要素，在 1.90~3.70 范围选用。由此，利用各灌区地理气象影响因子，可以得出全疆灌区大田滴灌不同作物种类作物系数见图 1 所示，由结果可以看出，1) 不同灌区滴灌作物种类，具有双子叶系数大于单子叶作物系数相同的变化，滴灌种类作物系数大小变化表现为水稻 > 林果类 > 双子叶 > 单子叶作物，与植物水分生理需水特性吻合。2) 从不同灌区滴灌作物系数大小变化看出，作物种类均表现出：南疆灌区 > 东疆灌区 > 北疆灌区变化特征，这

表明滴灌作物系数与灌区地理区位、降水蒸发气象水文、干旱环境程度呈正相关，反映了滴灌作物系数对于作物需水量之间的水分生长重要地理环境特征属性。

Table 2. Research results of drip irrigation experiment in Xinjiang in recent years
表 2. 近年新疆滴灌作物灌溉试验研究成果

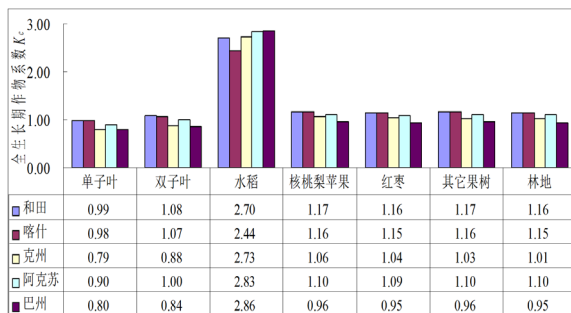
作物	代表区域	试验年份	3~9 月蒸发蒸腾 ET_0 /mm	灌溉定额/mm	灌水定额/mm	灌水次数	全生长期作物系数 K_c		
							下限	上限	平均
1 冬 小 麦	石河子	2015~2018	426	525~600	45~53	11	1.23	1.41	1.32
	昌吉	2017~2018	585	420~450	45	9~10	0.72	0.77	0.74
	奇台	2014~2016	558	420~465	53	8~9	0.75	0.83	0.79
	乌鲁木齐	2013	597	405~473	45~53	9	0.68	0.79	0.73
	乌苏	2014	458	458~570	53~60	8~10	1.00	1.25	1.12
	博乐	2013	477	450~570	45~53	10~11	0.94	1.19	1.07
	裕民县	2016	411	300~375	45~53	6~7	0.73	0.91	0.82
	阿克苏	2017	681	495~540	45	11~12	0.73	0.79	0.76
	莎车	2017	521	450	45	10	0.86	0.86	0.86
	和静	2017	521	390~450	45	9~10	0.75	0.86	0.81
	石河子	2012~2014	432	375~450	45	8~10	0.87	1.04	0.95
	乌鲁木齐	2017	566	375~450	45	8~10	0.66	0.80	0.73
	昌吉	2013~2015	615	398	45	8	0.65	0.65	0.65
	阿勒泰	2016	389	405	45	9	1.04	1.04	1.04
2 春 小 麦	福海	2015	806	405~450	45	9~10	0.50	0.56	0.53
	木垒	2014	701	225~315	45	5~7	0.32	0.45	0.39
	额敏	2014	570	315~420	45~53	7~8	0.55	0.74	0.64
	托里	2013	596	368~420	53	7~8	0.62	0.71	0.66
	阿克苏	2018	666	375~450	45~53	8	0.56	0.68	0.62
	拜城县	2015	320	420	45~53	8~9	1.31	1.31	1.31
	焉耆	2012	473	420~473	53	8~9	0.89	1.00	0.94
3 春 玉 米	石河子	2016	470	525~600	45~53	10~11	1.12	1.28	1.20
	沙湾	2016	528	510~540	45~53	10~11	0.97	1.02	0.99
	昌吉	2013~2015	615	495~600	45~53	8~10	0.80	0.98	0.89
	奇台	2015~2017	536	540~600	45~53	8~11	1.01	1.12	1.06
	伊宁县	2016	474	510~540	45~53	10~11	1.08	1.14	1.11
4 复 播 玉 米	阿克苏	2013	570	450~465	45~53	7~8	0.79	0.82	0.80
	库尔勒	2011	653	420	53	8	0.64	0.64	0.64
5 水 稻	石河子	2017	401	1028	53~75	14~20	2.57	2.57	2.57
	阜康市	2012	570	1335	53~75	17~25	2.34	2.34	2.34
	昌吉	2009	599	1125~1200	53~60	19~22	1.88	2.01	1.94

Continued

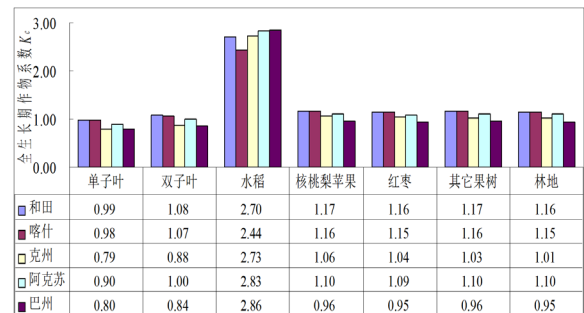
6 谷 子	昌吉	2013~2015	615	525	45	11	0.85	0.85	0.85
	博乐	2016	507	375~450	45~53	7~10	0.74	0.89	0.81
	石河子	2015	429	375~450	45~53	8~10	0.87	1.05	0.96
7 土 豆	昌吉	2013~2015	615	510	45	11	0.83	0.83	0.83
	巴里坤	2012	587	300~450	30~45	8~10	0.51	0.77	0.64
	裕民	2012	519	225~300	45	5~6	0.43	0.58	0.51
8 大 豆	石河子	2010	420	300~375	45	6~8	0.71	0.89	0.80
	昌吉	2013~2015	615	450	45	10	0.73	0.73	0.73
	伊宁县	2017~2018	398	300~420	45	6~9	0.75	1.06	0.91
	布尔津	2011	494	270~330	45	6~7	0.55	0.67	0.61
9 棉 花	石河子	2013~2018	426	450~480	45	10~11	1.06	1.13	1.09
	昌吉	2017	575	450~525	45~53	9~10	0.78	0.91	0.85
	玛纳斯	2015	842	450~525	53	9~10	0.53	0.62	0.58
	博乐	2014	557	450~570	53	8~9	0.81	1.02	0.92
10 油 菜	库尔勒	2015~2016	744	555	45~53	10~12	0.75	0.75	0.75
	昌吉	2013~2015	615	533	45	11	0.87	0.87	0.87
11 复 播 葵 花	石河子	2009	449	225~300	45	5~6	0.50	0.67	0.59
	昌吉	2013	542	225~300	45	5~6	0.42	0.55	0.48
	昌吉(正播)	2013~2015	615	450	45	10	0.73	0.73	0.73
	玛纳斯	2012	581	225~300	45	5~6	0.39	0.52	0.45
12 甜 菜	昌吉	2013~2015	615	495	45	11	0.80	0.80	0.80
	玛纳斯	2018	804	473~540	45~53	10~12	0.59	0.67	0.63
	塔城	2006	527	300~390	38~45	8~10	0.57	0.74	0.66
13 蕃 茄	昌吉	2013~2015	615	525	45	11	0.85	0.85	0.85
	吐鲁番	2014~2017	701	795~900	45~53	15~20	1.13	1.28	1.21
14 葡 萄	哈密	2013~2017	419	720~750	45~53	13~16	1.72	1.79	1.76
	阜康	2011~2013	542	525~600	53	10~11	0.97	1.11	1.04
	伊宁	2014	407	465~525	53	9~10	1.14	1.29	1.22
	于田	2012	426	750~795	45	16~17	1.76	1.87	1.81
	塔城	2007	662	225~300	38	6~8	0.34	0.45	0.40
15 打 瓜	额敏	2005	645	270~315	45	6~7	0.42	0.49	0.45
	福海	2005	600	270~315	45	6~7	0.45	0.53	0.49
	阜康	2008	584	375~450	38~45	8~12	0.64	0.77	0.71
	昌吉	2013~2015	615	465	45	10	0.76	0.76	0.76
16 西 瓜	阜康	2015	689	375~450	38~45	8~12	0.54	0.65	0.60

Continued

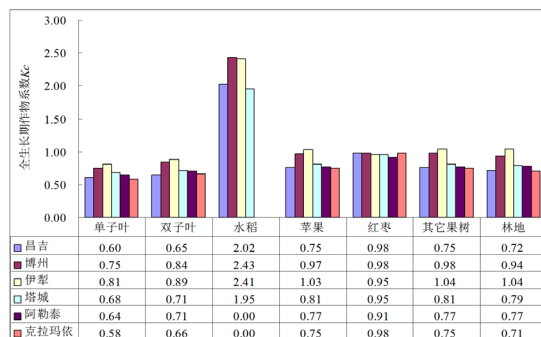
17	哈密	2015	420	315~420	35	6~8	0.75	1.00	0.88
甜瓜	昌吉	2012	587	405~525	45~53	9~11	0.69	0.90	0.79
18	昌吉	2015	662	450~563	38	12~15	0.68	0.85	0.77
辣椒	昌吉	2013~2015	615	420~480	45	9~10	0.68	0.78	0.73
19	裕民	2008	693	300~338	38	8~9	0.43	0.49	0.46
胡萝卜	巴里坤	2010	575	360~450	45	8~10	0.63	0.78	0.70



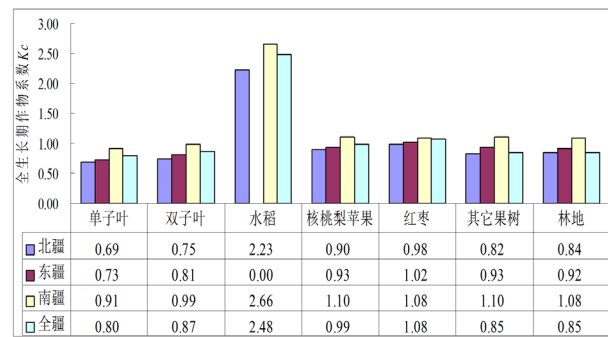
(a) 和田、喀什、克州、阿克苏、巴州



(b) 吐鲁番、哈密



(c) 昌吉、博州、伊犁、塔城、阿勒泰、克拉玛依



(d) 北疆、东疆、南疆、全疆

Figure 1. Crop coefficient K_C of drip irrigation crop species in irrigation area

图 1. 灌区滴灌作物种类全生长期作物系数 K_C

3.3. 作物需水验证分析

基于滴灌作物系数以各灌区 1952~2019 年系列气象数据, 按彭曼模型计算滴灌作物种类需水量, 与 2013~2018 年滴灌作物需水量试验结果比较, 见表 3, 可以看出, 北疆灌区单子叶、双子叶、水稻 3 类, 滴灌需水量分别减少 4.2%、3.9%和增加 3.8%, 3 类作物平均增加 0.4%; 东疆灌区单子叶、双子叶、水稻 3 类, 滴灌需水量分别减少 1.0%、增加 0.2%和 1.6%, 3 类作物平均增加 0.7%; 南疆灌区单子叶、双子叶、水稻 3 类, 滴灌需水量分别增加 0.3%、2.5%和 3.2%, 平均增加 2.4%。从全疆灌区总体看, 单子叶、双子叶、水稻 3 类, 滴灌作物需水量分别减少 2.0%、0.6%和增加 3.3%, 3 类作物平均增加 1.3%, 由滴灌作物系数计算与滴灌试验结果, 两者差异范围较小具有同质性, 为滴灌用水定额研究提供了技术保障。

3.4. 不同滴灌作物需水分配

滴灌作物需水, 因作物种类需水量大小和分配有所差别。采用新疆灌溉中心试验站 2016~2018 年连续 3

年,北疆灌区滴灌 15 种作物同期需水试验研究成果,按式(5)计算不同滴灌作物需水分配系数,见表 4 所示。15 种作物需水量相对小者为春小麦,最大者为旱作水稻,需水量由小到大顺序:春麦、油菜、甜菜、胡萝卜、冬麦、打瓜、葵花、番茄、谷子、春玉米、大豆、土豆、棉花、苜蓿、旱作水稻。试验分析结果看,不同作物滴灌需水量有较大差异,反映了作物水分需求特征。灌区大田 30 种不同滴灌作物需水占比系数,单子叶、双子叶作物基于表 4 计算,水稻和林果类需水特征明显,采用滴灌作物系数计算需水量成果。

Table 3. Comparison and analysis of water requirement of two kinds of drip irrigation crops
表 3. 两种方式的滴灌作物种类需水量比较分析

灌区	(1) 作物系数计算需水/mm			(2) 滴灌试验需水/mm			与(2)比较/±%			平均
	单子叶	双子叶	水稻	单子叶	双子叶	水稻	单子叶	双子叶	水稻	
和田	459	491	1203	449	464	1184	2.2	5.7	1.6	2.6
喀什	453	483	1178	450	467	1103	0.7	3.4	6.8	4.6
克州	432	476	1298	455	494	1292	-5.1	-3.7	0.4	-1.6
阿克苏	440	476	1214	429	456	1172	2.4	4.3	3.5	3.5
巴州	447	468	1298	438	453	1248	2.1	3.3	4.0	3.4
吐鲁番	518	560	—	512	555	—	1.1	0.8	—	0.9
哈密	431	462	1203	446	462	1184	-3.5	0.0	1.6	0.2
乌鲁木齐	399	429	1191	471	495	1178	-15.3	-13.3	1.1	-5.8
昌吉州	428	453	1236	452	474	1170	-5.4	-4.4	5.6	1.0
博州	404	435	1193	419	438	1182	-3.7	-0.7	0.9	-0.4
塔城	432	455	1260	443	465	1160	-2.5	-2.3	8.6	3.8
伊犁州	390	417	1116	407	428	1086	-4.2	-2.6	2.8	0.1
阿勒泰	399	428	—	425	444	—	-6.1	-3.7	—	-4.9
克拉玛依	396	453	—	390	450	—	1.5	0.7	—	1.1
北疆平均	411	438	1199	429	456	1155	-4.2	-3.9	3.8	0.4
东疆平均	474	510	1203	479	509	1184	-1.0	0.2	1.6	0.7
南疆平均	446	479	1238	444	467	1199	0.3	2.5	3.2	2.4
全疆平均	432	465	1217	441	468	1178	-2.0	-0.6	3.3	1.3

Table 4. Average proportion coefficient of water requirement of different crop species under drip irrigation
表 4. 滴灌不同作物种类需水量均值占比系数

单子叶作物 k_i	冬麦	春麦	春玉米	夏玉米	谷子			
	1.00	0.85	1.11	0.93	1.10			
双子叶作物 k_i	土豆	大豆	薯类	油菜	葵花	棉花	甜菜	蕃茄
	1.02	1.03	1.04	0.86	0.99	1.05	0.91	1.00
	辣椒	胡萝卜	其它蔬菜	打瓜	西瓜	甜瓜	葡萄	苜蓿
	0.93	0.92	0.92	0.94	0.96	0.95	1.15	1.07

3.5. 土壤质地地理区位对滴灌用水影响

同作物生长在粘壤土、壤土质、沙土质,分布在“前山带”、“平原带”、“盆地区”地理区位,滴灌用水需求有相对增加现象,研究滴灌用水定额,尤其是干旱区新疆地理气象水文环境多样性,更需

考虑滴灌用水定额科学合理实用性。基于中国科学院资源环境科学数据中心、国家北斗卫星地理空间分布网格解析,分析得不同土壤质地地理区位及其植物生长耗水量变化见图 2 所示,分析结果可知,灌区粘壤土、壤土质、沙土三类土壤质地,总体分布面积为 1.03、25.91、747.77 万 hm^2 ,占比分别为 0.21%、5.16%和 94.63%。结果表明,粘壤土各灌区分布极少,东疆灌区几乎没有,轻中壤质适宜的土壤质地,全疆灌区面积占比仅 3.72%~6.49%,而 93.43%~95.94%为沙土类质地,这体现干旱荒漠新疆灌区土壤自然肥力普遍低的状况。灌区“前山带”、“平原带”、“盆地”地理区位,总体分布面积为 58.44、403.43 和 40.04 万 hm^2 ,占比为 11.65%、80.41%和 7.98%。结果表明,全疆灌区 78%~86%分布平原带,5%~8%分布于盆地区,6%~16%分布于前山区。东疆区 45%左右分布于盆地,其次近 40%面积分布在平原区,说明东疆尤其吐鲁番地理区位作物耗水量相对其它灌区高。

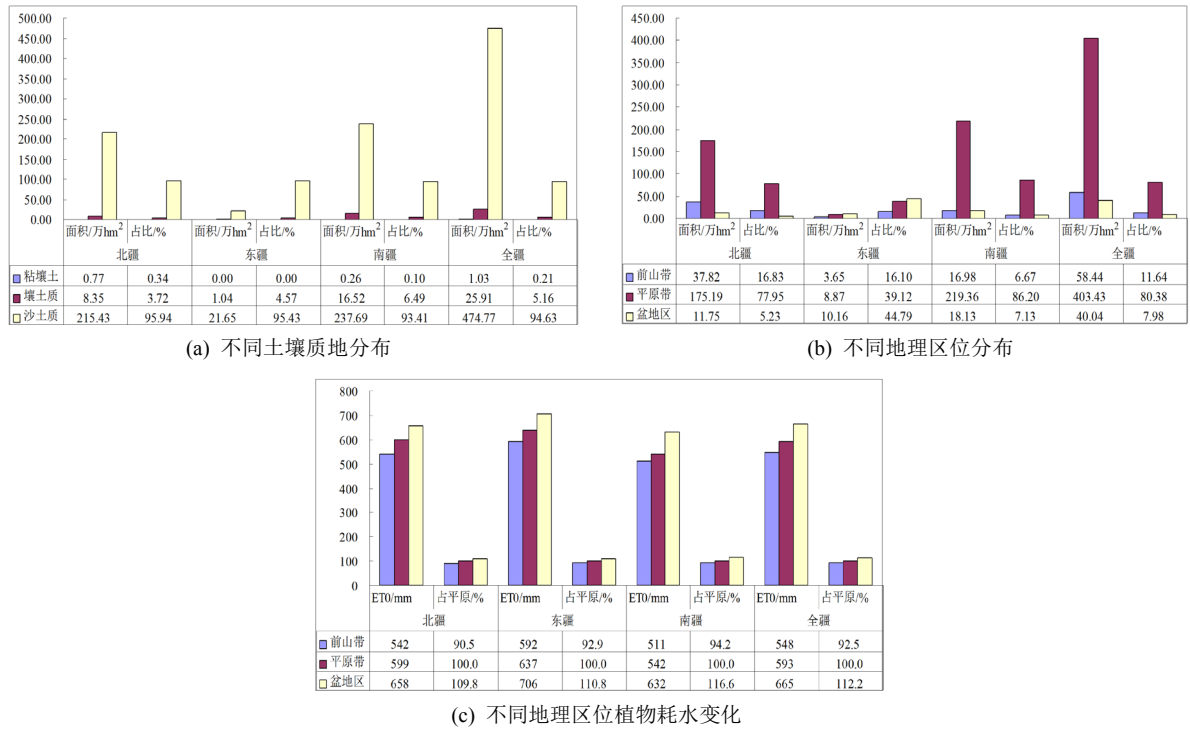


Figure 2. Distribution of plant water consumption in different soil texture geographical location of irrigation area
图 2. 灌区不同土壤质地地理区位植物耗水分布

由图 2(c)可知,北疆灌区,“前山带”、“平原带”、“盆地”区位,植物生长耗水分别为 542 mm、599 mm 和 659 mm,前山带和盆地区植物耗水量为平原区的 90.5%和 109.8%;东疆灌区三类地理区位,植物生长耗水量分别为 592 mm、637 mm 和 706 mm,前山带和盆地植物耗水量为平原区的 92.9%和 110.8%;南疆灌区三类地理区位,植物生长耗水量分别为 511 mm、542 mm 和 632 mm,前山带和盆地区植物耗水量为平原区的 94.2%和 116.6%。

由地理区位植物生长耗水分布来看,呈现东疆灌区高北疆灌区次之南疆灌区相对少,西部灌区小东部灌区大,山区及山前带小,平原灌区逐步增大盆地边缘相对减小,盆地腹部加原带(平原中部) > 山前带基本规律。

3.6. 滴灌作物用水定额

基于上述,利用各灌区长系列农业气象信息,采用彭曼模型结合滴灌试验作物系数需水计算,运

用不同滴灌试验分析作物需水分配, 采用式(6)~(13)进行灌区土壤质地和地理区位对作物用水影响系数, 考虑平水年 50%和偏早年 75%灌溉保证率以及扣除灌区有效降水量, 综合研究分析得 86 个县域 5 个一级 40 个二级灌溉分区 1623 个滴灌田间用水定额成果。

限于篇幅本文仅给出 14 个地州所属灌区 30 种不同作物滴灌田间灌溉用水定额综合成果, 见表 5、表 6 和图 3 所示。由各地州滴灌田间用水定额来看, 正常年份灌溉保证率 50%条件, 和田、喀什、克州、阿克苏、巴州、吐鲁番、哈密、乌鲁木齐、昌吉州、博州、伊犁州、塔城、阿勒泰和克拉玛依灌区, 滴灌田间用水定额分别为 380、375、372、381、380、498、359、405、354、360、351、345、348、389 mm, 偏旱灌溉保证率 75%滴灌田间用水定额, 高于 50%灌溉保证率的 10.4%~15.4%。

Table 5. Irrigation water quota of drip irrigation crops (unit: mm)

表 5. 滴灌作物田间灌溉用水定额(单位: mm)

作物	和田灌区		喀什灌区		克州灌区		阿克苏灌区		巴州灌区		吐鲁番灌区		哈密灌区	
	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%
冬小麦	403	446	401	458	383	435	412	463	405	457	0	0	370	415
春小麦	323	366	315	371	323	368	325	370	328	373	413	465	315	360
春玉米	407	450	405	459	390	435	405	456	412	463	520	580	380	430
夏玉米	343	386	340	394	398	450	385	444	387	440	470	540	0	0
水稻	1211	1347	1211	1352	1200	1350	1203	1355	1313	1388	0	0	0	0
谷子	373	431	364	419	349	398	361	406	358	403	453	515	340	383
土豆	354	404	346	395	360	405	350	398	387	438	470	540	370	430
大豆	343	384	339	393	338	386	340	393	345	390	460	518	355	415
薯类	354	404	346	395	360	405	350	398	355	403	470	540	370	430
油菜	343	390	336	387	353	401	337	391	343	392	450	503	318	363
葵花	388	435	385	439	364	409	383	428	370	415	460	513	355	405
棉花	414	461	415	477	435	488	412	456	414	468	540	620	385	435
甜菜	0	0	0	0	360	413	352	397	347	401	0	0	0	0
蕃茄	399	443	388	453	371	416	383	430	375	422	530	598	360	415
辣椒	373	407	364	421	375	420	367	412	362	407	490	560	335	383
胡萝卜	366	409	359	416	364	398	361	406	350	400	485	555	335	383
其它蔬菜	366	409	359	416	360	394	361	406	350	400	485	555	335	383
打瓜	373	414	370	431	360	405	368	421	353	398	485	555	335	383
西瓜	375	418	370	431	383	428	382	430	368	413	490	560	335	383
甜瓜	375	418	370	431	380	425	376	424	358	403	485	555	335	383
核桃、无花果、 苹果、梨树	476	523	472	530	455	510	465	538	459	516	575	655	410	470
红枣	446	491	453	525	430	483	438	508	438	498	0	0	435	495
葡萄	448	495	451	524	425	478	438	497	427	482	610	705	450	555
其它果树	439	499	453	535	435	491	453	515	445	498	560	640	400	465
苜蓿	416	461	406	464	398	443	413	458	398	446	500	575	375	435
林地 (防护生态苗圃)	431	476	423	478	435	484	442	500	438	498	565	650	390	460

注: 核桃种植主要为和田灌区, 无花果主要为克州灌区, 苹果主要为阿克苏灌区, 梨树主要为巴州灌区。

Table 6. Water quota for field irrigation of drip irrigation crops (unit: mm)
表 6. 滴灌作物田间灌溉用水定额(单位: mm)

作物	乌鲁木齐		昌吉州灌区		博州灌区		克拉玛依		塔城灌区		伊犁州灌区		阿勒泰灌区	
	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%	50%	75%
冬小麦	428	468	388	433	370	420	390	435	373	422	377	422	369	414
春小麦	325	365	300	347	320	365	330	375	287	332	296	341	274	319
春玉米	440	495	395	443	380	428	390	435	373	418	390	435	369	414
夏玉米	0	0	0	0	0	0	0	0	380	425	0	0	0	0
水稻	1215	1305	1238	1335	1200	1335	0	0	1095	1245	1170	1253	0	0
谷子	380	420	347	392	345	390	360	405	329	374	330	375	326	371
土豆	435	480	375	420	370	420	383	428	363	409	369	414	356	401
大豆	425	470	345	390	360	405	375	420	354	399	338	383	341	386
薯类	435	480	375	420	370	420	383	428	363	409	369	414	356	401
油菜	358	403	345	390	315	365	345	390	313	355	327	372	321	366
葵花	400	435	362	407	350	400	368	413	345	391	369	414	347	392
棉花	150	165	396	441	398	448	420	465	402	455	426	471	0	0
甜菜	253	295	343	388	328	378	338	383	312	354	338	383	311	356
蕃茄	405	435	375	420	360	405	390	435	351	399	369	414	356	401
辣椒	405	435	345	390	340	385	360	405	326	371	345	390	326	371
胡萝卜	390	423	330	374	335	380	360	405	326	371	330	375	326	371
其它蔬菜	390	423	330	374	335	380	360	405	326	371	345	390	326	371
打瓜	390	423	345	390	338	380	368	413	319	371	332	376	326	371
西瓜	390	423	354	405	350	395	375	420	331	379	353	398	336	381
甜瓜	390	423	354	405	350	395	375	420	331	379	353	398	336	381
苹果	470	515	423	468	450	495	465	510	392	450	460	515	420	465
红枣或枸杞	0	0	0	0	435	488	450	495	0	0	0	0	0	0
葡萄	415	470	400	445	428	473	435	480	398	444	418	463	405	450
其它果树	455	515	408	453	430	475	450	495	401	448	440	491	411	459
苜蓿	405	450	373	417	380	425	405	450	362	407	374	417	377	422
林地 (防护生态苗圃)	443	500	394	446	415	460	450	495	379	429	411	470	394	439

注: 枸杞种植主要为博州及克拉玛依灌区, 其它灌区多有苹果种植。

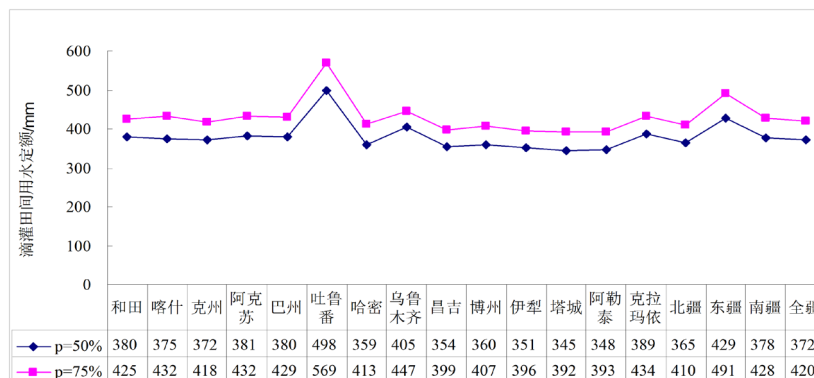


Figure 3. Field water quota of integrated drip irrigation
图 3. 综合滴灌田间用水定额

由全疆灌区分布来看,北疆灌区 50%和 75%灌溉保证率,滴灌田间用水定额为 365 mm 和 410 mm,两者相差 12.3%;东疆灌区滴灌田间用水定额为 429 mm 和 491mm,两者相差 14.5%;南疆灌区滴灌田间用水定额 378 mm 和 428 mm,两者相差 13.2%。灌区综合滴灌田间用水定额 372 mm 和 420 mm,两者相差 12.9%。滴灌田间用水定额呈现东疆灌区 > 南疆灌区 > 北疆灌区,与地理环境区位有效降水气象水文、植物水分蒸散及作物需水特征一致。

4. 结论

本研究在新疆农业灌溉用水定额技术指标应用实践的基础上,结合新疆近 10 年来多种滴灌作物用水试验研究成果,根据新疆近 100 个县级气象测点,1951 年~2019 年 67 年长系列农业气象数据,采用相关技术方法多层次考虑灌区灌溉用水、生产要素,综合研究集成分析构建了干旱区新疆 30 种作物滴灌用水定额,形成灌溉分区内 1623 个滴灌用水定额技术指标,涵盖了新疆农业灌区大田粮作、经作、蔬菜、果树、林地、牧草大宗类作物滴灌用水,为滴灌农业节水管理提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 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, 2017: 35-37.
- [2] 周和平, 王忠. 新疆地区作物耗水时空多样性特征分析[J]. 灌溉排水学报 2011, 30(6): 15-19.
- [3] 周和平, 姚新华, 陈跃滨, 等. 干旱区新疆农业节水技术理论研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014: 1-10.
- [4] 新疆维吾尔自治区水利厅. 2016 新疆水资源公报[Z]. 新疆水利厅网站, 2018(9).
- [5] 中华人民共和国水利部. 2016 年中国水资源公报[Z]. 中国水利部网站, 2017(7).
- [6] 水利部农村水利水电司. 2018 农村水利水电工作年度报告[R]. 2019(4): 11-12.
- [7] 孙亭文. 我区五年新增高效节水面积 1588 万亩[N]. 新疆日报, 2017-10-09.
- [8] 李国治, 李伊, 满本菊, 等. 滴灌冬小麦抽穗期旗叶对水分的生理响应[J]. 节水灌溉, 2019(7): 6-12.
- [9] 林霞, 洪雪梅. 冬小麦新冬 48 号高产滴灌栽培技术[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(7): 100-101.
- [10] 李杰, 陈锐, 吴杨焕, 等. 北疆地区滴灌冬小麦农田蒸散特征[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 31-37.
- [11] 张迪, 孙婷, 王冀川, 等. 不同水氮组合对滴灌冬小麦叶片保护性酶活性及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(10): 1775-1785.
- [12] 薛丽华, 赵连佳, 孙诗仁. 水氮耦合对滴灌冬小麦光合特性、产量及水氮利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(30): 12-19.
- [13] 赛力汗·赛, 张永强, 薛丽华, 等. 新疆滴灌冬小麦灌溉量对产量形成与水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(8): 30-40.
- [14] 崔月, 张宏芝, 赵奇, 等. 水肥运筹对滴灌冬小麦干物质积累和产量调控效应研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 55(4): 618-626.
- [15] 如先古力·阿吾提, 马英杰, 周会军, 等. 不同灌水量对叶尔羌河灌区滴灌冬小麦产量及水分利用率的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2018, 41(4): 287-291.
- [16] 陈慧, 黄振江, 王冀川, 等. 水氮耦合对滴灌冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 44-56.
- [17] 吴高明. 裕民县河灌区冬小麦滴灌高产栽培技术示范小结[J]. 新疆农业科技, 2017(4): 23-24.
- [18] 余顺和, 郑梅玲. 和静县冬小麦滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2017(7): 19-20.
- [19] 地力夏提·吐尔地. 且末县滴灌冬小麦高产优质高效栽培技术规程[J]. 农民致富之友, 2016(7): 41.
- [20] 雷钧杰, 张永强, 张宏芝, 等. 不同滴灌量对冬小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(4): 596-603.
- [21] 张燕, 加孜拉. 新疆奇台县滴灌冬小麦节水增产关键技术[J]. 安徽农业科学, 2014(25): 8530-8531.
- [22] 薛丽华, 谢小清, 段丽娜, 等. 滴灌次数对冬小麦根系生长及时空分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014(6):

- 1-9.
- [23] 田玉琴. 乌苏市冬小麦滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2015(6): 9-10.
- [24] 刘萍, 魏建军, 张东升, 等. 播期和播量对滴灌冬小麦群体性状及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 1202-1207.
- [25] 李少强, 丁海峰. 博乐垦区滴灌冬小麦高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2013(3): 6-7.
- [26] 张文辉, 杨相昆. 一三〇团滴灌冬麦栽培几个问题初探[J]. 新疆农垦科技, 2011(6): 8-10.
- [27] 冯波, 王新武, 苏豫梅, 等. 不同滴灌处理对春小麦土壤耗水量、生长及产量的影响[J]. 新疆农垦科技, 2012(7): 49-51.
- [28] 王振华, 王克全, 葛宇, 等. 新疆滴灌春小麦需水规律初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 61-64.
- [29] 邹升, 王冀川, 陈慧, 等. 滴灌水氮运筹对春小麦根冠生长及产量的影响[J]. 江苏农业科技, 2019, 47(12): 129-133.
- [30] 徐万疆, 徐红军, 崔凤娟, 等. 红山农场滴灌春小麦超高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2018, 41(9): 3-5.
- [31] 魏彦宏, 张彦红, 周勃. 拜城县滴灌春小麦最佳灌水量研究[J]. 河南农业, 2016(20): 27-28.
- [32] 陈凯丽, 赵经华, 马英杰, 等. 不同水氮处理对阿勒泰地区滴灌春小麦生长、产量及水氮利用的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40(2): 85-91.
- [33] 李红梅. 福海县滴灌春小麦高产栽培技术[J]. 农村科技 2016(3): 6-7.
- [34] 王国栋, 曾胜和, 周建伟, 等. 基于控墒补灌的春小麦滴灌制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014(6): 19-25.
- [35] 牟洪臣, 王振华, 何新林, 等. 不同灌水处理对北疆滴灌春小麦生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2015(1): 27-32.
- [36] 宋常吉, 王振华, 郑旭荣, 等. 北疆滴灌春小麦耗水特征及作物系数的确定[J]. 西北农业学报, 2013, 22(3): 58-63.
- [37] 潘进武. 木垒县西吉镇滴灌区春小麦高产栽培技术[J]. 农家顾问, 2015(6): 61.
- [38] 赵东宾, 杨哲, 徐向阳. 春小麦滴灌节水高产高效栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2015, 38(9): 7-8.
- [39] 谷士林. 春小麦加压滴灌高产栽培技术[J]. 科学种养, 2014(1): 13-14.
- [40] 余红梅, 乔旭. 托里县春小麦滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2014(8): 10-11.
- [41] 刘宏亮. 二十一团春小麦滴灌栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2013(11): 11-12.
- [42] 周和平, 赵经华, 张娜, 等. 渗墒灌溉节水降耗应用试验[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(1): 76-86.
- [43] 翟超, 周和平, 赵健. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2769-2780.
- [44] 万晓菊, 张国强, 王克如, 等. 北疆春玉米覆膜、滴灌技术效应研究[J]. 作物杂志, 2019(4): 107-112.
- [45] 沈东萍, 张国强, 王克如, 等. 滴灌量对高产春玉米冠层结构特征及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(8): 1137-1145.
- [46] 吴新明, 丁变红, 张小伟, 等. 春玉米滴灌密植高产配套栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(11): 9-10.
- [47] 程晓媛, 李俊玲, 盛建东. 高密度滴灌覆膜条件下不同灌水量对春玉米产量的影响[J]. 农村科技, 2017(10): 10-12.
- [48] 王克全, 王国栋, 梁飞, 等. 灌溉定额对膜下滴灌春玉米土壤水热空间分布及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(11): 25-29.
- [49] 郭斌, 赵新俊, 王璞, 等. 新疆膜下滴灌高产春玉米水肥优化研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20): 88-93.
- [50] 唐亚莉, 董文明, 蒲胜海, 等. 伊犁新垦区玉米滴灌技术研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(10): 832-1838.
- [51] 杨丽兰, 曾宁江, 陈刚, 等. 复播玉米干播湿出滴灌高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(8): 11-12.
- [52] 王冀川, 徐雅丽, 阿皮旦木·达吾提, 等. 南疆滴灌条件下复播玉米冠层内温光特征分析[J]. 玉米科学, 2014(3): 109-114.
- [53] 李瑛. 南疆滴灌春小麦复播玉米效益分析[J]. 新疆农垦科技, 2012(12): 5-6.
- [54] 候建伟, 张君, 孟超然, 等. 新疆北疆膜下滴灌水稻耗水规律研究[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(2): 219-229.
- [55] 杨国安, 余伟, 范丽娟. 水稻旱作地膜覆盖直播加压滴灌节水栽培技术[J]. 农村科技, 2013(2): 7-8.
- [56] 马晓鹏, 莫彦, 吕玉平, 等. 不同灌水量与每穴直播粒数对滴灌水稻生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 1-7.

- [57] 秦君兰. 膜下滴灌旱作水稻机械化直播技术[J]. 新疆农业科技, 2010(4): 7.
- [58] 丛虎滋, 戴爱梅, 张洪浩. 新疆博州滴灌谷子优质高效栽培技术[J]. 农业科技通讯, 2017(3): 212-213.
- [59] 吴燕, 冯怀章, 罗正乾, 等. 滴灌马铃薯高产高效栽培技术[J]. 农村科技, 2017(6): 3-4.
- [60] 陈春梅. 滴灌马铃薯栽培技术[J]. 新疆农业科技, 2013(2): 40-43.
- [61] 加娜提·卡德尔别克. 马铃薯膜下加压滴灌栽培技术[J]. 农村科技, 2012(7): 18.
- [62] 杜孝敬, 符小文, 安崇霄, 等. 夏大豆干物质积累参数及产量对膜下滴灌量的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1751-1759.
- [63] 张永强, 徐文修, 李亚杰, 等. 新疆麦后复播大豆适宜滴灌量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 1133-1140.
- [64] 巴格迪努尔·曲汗. 布尔津县春大豆覆膜滴灌栽培模式[J]. 新疆农垦科技, 2012(5): 5-6.
- [65] 葛宇, 何新林, 王振华, 等. 不同灌水量对滴灌复播大豆生长及产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(3): 357-360.
- [66] 朱拥军, 黄劲松, 徐海峰, 等. 新疆地区滴灌小麦复播大豆施肥技术研究[J]. 天津农业科学, 2011, 17(5): 77-80.
- [67] 万刚. 麦后复播滴灌大豆技术[J]. 农村科技, 2010(10): 7.
- [68] 周和平, 翟超, 肖重华, 等. 干旱区滴灌多作物需水量及灌溉制度试验分析[J]. 农业科学, 2018, 8(10): 1119-1131. <https://doi.org/10.12677/hjas.2018.810165>
- [69] 谷士林. 食用向日葵滴灌高产栽培技术[J]. 科学种养, 2014(8): 18-19.
- [70] 段维, 杨涛. 食用向日葵膜下滴灌高产栽培技术[J]. 中国农业信息, 2014(5): 67.
- [71] 吕晓庆, 柳延涛, 陈寅初, 等. 滴灌小麦麦后免耕复播向日葵栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2013(9): 7-8.
- [72] 李万云, 王鹏. 滴灌小麦复播向日葵栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2010, 33(3): 11-12.
- [73] 王秀媛, 马卉, 高宏云, 等. 新疆北部棉花冠层结构特征对滴灌定额的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 416-423.
- [74] 王肖娟, 危常州, 陈林. 不同灌溉频率对滴灌棉花生长及产量的影响研究[J]. 新疆农垦科技, 2014(7): 55-58.
- [75] 喜献珍, 龚立佳, 王雪莹, 等. 新疆棉花膜下滴灌高产栽培技术分析[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2018, 30(4): 29-30.
- [76] 翟超, 周和平, 谢富明, 等. 膜下滴灌条件下棉花年际需水量变化试验分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 32-38.
- [77] 王谊, 杨丽红, 石莲花, 等. 不同灌水模式对北疆膜下滴灌棉花干物质积累和产量的影响[J]. 中国棉花, 2016, 43(12): 21-23.
- [78] 魏光辉. 干旱区不同地下水位对棉花膜下滴灌灌溉制度的响应研究[J]. 水资源开发与管理, 2017(1): 64-69.
- [79] 汪昌树, 杨鹏年, 姬亚琴, 等. 不同灌水下限对膜下滴灌棉花土壤水盐运移和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 232-238.
- [80] 冯振秀, 李安, 夏红斌. 博州垦区棉花膜下滴灌不同用水量对植株性状和产量的影响[J]. 现代农业科技, 2015(18): 25-26.
- [81] 王振华, 杨彬林, 谢香文, 等. 灌溉制度对膜下滴灌甜菜产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 158-166.
- [82] 董心久, 杨洪泽, 高卫时, 等. 天山北坡甜菜平作膜下滴灌栽培技术[J]. 中国糖料, 2016, 38(4): 53-55.
- [83] 朱海安, 郭陈会, 袁裕淮, 等. 塔额盆地甜菜膜下滴灌高产栽培技术[J]. 中国糖料, 2007(2): 47-48.
- [84] 雷海, 杨万森. 塔额盆地打瓜膜下滴灌丰产栽培技术[J]. 新疆农业科技, 2008(3): 51.
- [85] 和瑞, 曹松. 农九师打瓜滴灌工程技术经济效益浅析[J]. 新疆农机化, 2006(2): 34-35.
- [86] 王新中. 一八三团打瓜加压滴灌技术的应用[J]. 新疆农垦科技, 2006(6): 45-46.
- [87] 张忠福, 李艳娥, 李新梅, 等. 无公害打瓜膜下滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2009(7): 68-69.
- [88] 余卫疆. 新疆地区制种西瓜膜下滴灌栽培技术措施[J]. 中国种业, 2016(5): 66-67.
- [89] 再吐娜·买买提. 干旱地区膜下滴灌技术甜瓜种植模式探索[J]. 农业与技术, 2016, 36(24): 109.
- [90] 秦文玲. 一〇三团西甜瓜滴灌生产技术规程[J]. 农民致富之友, 2013(2): 96-97.

- [91] 唐学文. 色素用紫胡萝卜滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2014(6): 62-63.
- [92] 朱晓玲, 张志新. 胡萝卜滴灌高产栽培技术[J]. 农村科技, 2011(9): 35.
- [93] 杨光彬. 浅谈制干辣椒膜下滴灌高产栽培技术[J]. 新疆农业科技, 2016(2): 24-26.
- [94] 任灵通, 赵俊威, 吴新春, 等. 灌溉定额分配及水磷耦合对滴灌苜蓿生长规律的影响[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 164-174.
- [95] 洪明, 马英杰, 赵经华. 新疆阿勒泰地区浅埋式滴灌苜蓿灌溉制度试验[J]. 草地学报, 2017, 25(4): 871-874.
- [96] 侯裕生, 王振华, 李文昊, 等. 水肥耦合对极端干旱区滴灌葡萄耗水规律及作物系数影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 279-286.
- [97] 何建斌, 王振华, 何新林, 等. 极端干旱区不同灌水量对滴灌葡萄生长及产量的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(2): 65-69.
- [98] 张江辉, 刘洪波, 白云岗, 等. 极端干旱区滴灌葡萄水肥耦合效应研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 804-814.
- [99] 韦东, 卢震林. 吐鲁番地区成龄葡萄滴灌水分利用效率研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(21): 41-43.
- [100] 赵建国, 马英杰. 吐鲁番地区不同灌水量和毛管间距对葡萄生长和产量的影响[J]. 节水灌溉, 2014(5): 25-28.
- [101] 巩振兴. 葡萄地下滴灌包气带水分特征分析[J]. 地下水, 2014(4): 38-39.
- [102] 杨宝玉, 沈春元, 刘新全, 等. 新疆滴灌葡萄水肥耦合模型及特征分析[J]. 新疆农垦科技, 2012(12): 28-29.
- [103] 郭绍杰, 王文革, 董平, 等. 滴灌水量对葡萄生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(11): 2666-2668.
- [104] 苗壮. 极端干旱区滴灌葡萄耗水规律与产量变化研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2013(19): 32-34.
- [105] 胡安焱, 董新光, 魏光辉, 等. 滴灌条件下水肥耦合对干旱区红枣产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 60-63.
- [106] 王成, 孙凯, 王龙, 等. 南疆绿洲区滴灌红枣不同生育期水肥利用研究[J]. 节水灌溉, 2014(5): 18-21.
- [107] 胡琼娟, 陈杰, 马英杰, 等. 滴灌条件下核桃灌溉制度研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 244-247.
- [108] 白元, 徐海量, 刘新华, 等. 绿洲防护林不同滴灌水量下土壤水盐运移初探[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 153-159.
- [109] 康才周, 王理德, 朱淑娟. 兰新线黑山湖段铁路防护林地下滴灌灌水量的确定及效益分析[J]. 甘肃林业科技, 2006, 31(1): 15-17.
- [110] 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所, 编著. 新疆土壤与改良利用[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1977: 32-55.
- [111] 周和平. 新疆滴灌作物需水量与灌溉制度试验研究成果汇编(2013-2018) [R]. 新疆水利管理总站, 2019(1).
- [112] 中国科学院资源环境科学数据中心, 中国土壤质地空间分布数据, Copyright @ 2014-2017.
- [113] 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: 30-36.
- [114] 周和平, 王忠, 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.
- [115] 水利部国际合作司, 水利部农水司, 水利部农田灌溉研究所, 等. 美国国家灌溉工程手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 125-130.