

Evaluation of Soil Water Effect in Arid Irrigated Area

Heping Zhou^{1*}, Bei Wang², Yu Pan², Yanxin Gao³, Chao Zhai¹

¹Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Management General Station, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Research Institute, Urumqi Xinjiang

³Xinjiang Santun River Basin Management Office, Changji Xinjiang

Email: *xjslzhp@126.com

Received: Dec. 13th, 2018; accepted: Jan. 1st, 2019; published: Jan. 8th, 2019

Abstract

In order to explore the effect of drip irrigation and conventional irrigation on farmland water content in arid regions of Xinjiang, based on two-year positioning observation of 705,950 soil water content information in typical irrigation areas, irrigation theory and mathematical statistics were used to test and evaluate the results: 1) In Santun River of Northern Xinjiang, Gaochang of Turpan in East Xinjiang and Yutian Irrigation Area of Southern Xinjiang, the growth and decline of farmland soil water content were appropriate to crop water requirement. 2) The probability of soil moisture more than 50% and more than 60% is 0.85. The dry and wet state of soil is beneficial to crop growth. 3) The probability of soil water storage and effective water storage which accounts for more than 60% of field water capacity is more than 0.80. It shows that there are fewer tillage layers, more below 50 - 60 cm soil layers, less effective water in drip irrigation tillage layers than conventional furrow irrigation, and more drip irrigation and conventional irrigation in lower layers, which is beneficial for the root system to absorb deep water. 4) The field water use quota of drip irrigation for medium and heavy loam soil in Northern Xinjiang is 42 mm, and that for border irrigation is 57 mm, which is 26% less than that for border irrigation; the field water use quota for sticky and sandy loam grape furrow irrigation in Gaochang Irrigation Area of Turpan, East Xinjiang is 45 mm, and drip irrigation for sandy loam soil is 22 mm, which is 51% less than furrow irrigation; the field water use quota for walnut interplanting with wheat border irrigation for light sandy soil in Southern Xinjiang is 51%. Field water use quota is 38 mm. After irrigation, 80% of the water is in 40 - 60 cm soil layer, drip irrigation is 50 cm or less, and conventional irrigation is 70 cm or less. The running state of irrigation water in farmland provides a basis for water-saving irrigation water management.

Keywords

Arid Irrigated Area, Water Content Monitoring, Irrigation Water Effect, Analysis and Evaluation

*通讯作者。

干旱灌区土壤水分效应评析

周和平^{1*}, 王 蓓², 潘 渝², 高艳新³, 翟 超¹

¹新疆维吾尔自治区水利管理总站, 新疆 乌鲁木齐

²新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐

³新疆三屯河流域管理处, 新疆 昌吉

Email: xjslzhp@126.com

收稿日期: 2018年12月13日; 录用日期: 2019年1月1日; 发布日期: 2019年1月8日

摘 要

为探究干旱区新疆滴灌、常规灌模式农田水分效应问题, 基于典型灌区两年定位观测705,950土壤含水率信息, 采用灌溉理论及数理统计检验评析表明: 1) 北疆三屯河、东疆吐鲁番高昌和南疆于田灌区, 农田土壤含水率消长适宜作物需水要求。2) 作物生长期土壤湿度50%以上且 $\geq 60\%$ 概率为0.85, 土壤干湿状态利于作物生长。3) 土壤贮水量、占田间持水量60%以上有效水存量概率 ≥ 0.80 , 呈现耕层少, 50~60 cm土层以下增多, 滴灌耕层有效水分比常规沟畦灌少, 下层滴灌和常规灌溉保持较多, 利于作物根系汲取深层水分。4) 北疆灌区中、重壤土质滴灌田间用水定额42 mm, 畦灌57 mm, 滴灌比畦灌减少26%; 东疆吐鲁番高昌灌区粘性及沙壤葡萄沟灌, 田间用水定额45 mm, 滴灌沙壤土22 mm, 滴灌比沟灌减少51%; 南疆于田灌区核桃套种小麦畦灌轻沙壤, 田间用水定额38 mm。灌水后水量80%在40~60 cm土层, 滴灌50 cm及以下, 常规灌70 cm及以下。农田灌溉水分运行状态, 为节水灌溉用水管理提供了依据。

关键词

干旱灌区, 含水率监测, 灌溉水分效应, 分析评估

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

土壤水分有效性是作物生长基本水环境条件, 常规沟、畦灌, 微灌(微喷、滴、渗灌)土壤水分运动遵循达西定律, 符合三维土壤水分运动方程[1]。滴灌土壤水分运动数值模拟表明[2] [3] [4]: 土壤含水量随时间增大最终趋于稳定, 水分运移有明显滞后效应; 竖直方向0~30 cm土壤水分变化明显, 40 cm以下变化小且水分稳定; 滴灌水分一般不产生深层渗漏, 但存在地下水沿土壤毛管上升进入非饱和带。不同灌溉方式土壤水分湿润面分析表明[5] [6] [7] [8] [9]: 微灌土壤含水率随湿润体半径增大而减小, 滴头区域含水率大; 点源滴灌土壤水分运动遵循点源入渗、湿润锋交汇和最后形成湿润带规律, 灌水结束后, 砂壤土灌水入渗量和深度相对壤土、黏壤土要大。微灌土壤水分运行试验表明[10] [11] [12]: 渗灌24 h后, 水分至地表下70 cm处, 湿润体水平方向运移不明显, 湿润锋运移为时间平方根线性函数, 地表滴灌有类似[13]表现, 渗灌毛管附近土壤含水率变幅大, 灌水前田间毛管附近(20~40 cm)处土壤水分均匀度

较低, 灌水后均匀度提高; 地表滴灌试验表明[14] [15]: 随滴灌量增大水分呈半椭球体分布, 湿润体大小受滴灌量和土壤质地影响, 新疆棉田轻壤土多点源滴灌土壤水分运移试验, 滴水 4 h 左右地表饱和区半径最大为 20~25 cm, 土壤径向和垂向湿润锋与灌水量关系可用幂函数描述。

土壤水分有效利用, 是作物生产效率技术指标之一。渭北黄土高原苹果园不同灌溉方式试验[16]结果: 耕作层土壤含水率由高到低为膜下滴灌 > 膜下沟灌 \approx 滴灌 > 沟灌, 膜下滴灌土壤储水量、产量和水分利用效率大于滴灌; 膜下滴灌棉田试验表明[17], 不同环境和土质条件下, 大定额滴灌同样存在浪费用水和无显著增产情况, 不同覆盖物对作物水分利用效率试验表明[18] [19] [20], 塑料和秸秆覆盖土壤水分含量高, 裸地土壤储量低, 覆膜减少土壤水分消耗水分利用效率效果好。

土壤水资源是土壤水分不断补给与消耗的作物生长动态水量[21], 有限灌水量可刺激作物根系生长吸取深层水分[22], 土壤水存储、补给、更新、平衡, 节水灌溉、土壤水有效利用、田间水生态环境, 对微灌节水及土壤深层水资源转化利用有重要意义。农田分层土壤水资源, 常规灌溉试验表明[23] [24], 晋西黄土残塬沟壑区刺槐林, 0~20 cm 土壤水分利用少、0~50 cm 土壤水分季节变化较大, 20~100 cm 为土壤水分调节层; 喷灌试验表明[25] [26], 喷灌麦田不同水分处理, 10~20 cm 土层受降雨、蒸散和根系等因素影响大, 作物根系相对集中于表层, 有上移现象, 根长密度最大在 20 cm 深度, 土壤水分利用主要耕作层。滴灌西瓜、棉花试验表明[27] [28], 土壤水分垂直方向分层明显, 灌后土壤水分集中 0~40 cm 土层, 0~20 cm 土壤水分活跃, 20~60 cm 土壤水分次之, 60 cm 以下土壤水分稳定。渗灌试验表明[29], 新疆博乐垦区棉田土壤水分变化深度 20~60 cm, 根系分布 10~80 cm 范围, 主要集中在 15~50 cm。渗灌土壤水分运移, 先等速移动呈圆形扩散, 其次不等速呈卵形移动, 下移速度快上行运移小。渗灌比地表滴灌土壤水分蒸发量减少 35%, 水分利用率高[30]。金世杰等[31]研究认为, 土壤水分再分布可有效调节根系层土壤水分状况、丰富群落结构, 提升作物对深层土壤水肥响应。综上所述, 灌溉农田水分效应多以单一技术指标分析, 本文基于典型灌区定位监测土壤含水率数据, 着眼干旱区不同作物灌溉方式土壤水分效应, 进行土壤含水率与土壤湿度、土壤贮水量、土壤有效水分、灌水定额等综合评析, 为节水灌溉用水管理提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 测区概况

土壤水分监测选择北疆、东疆、南疆三处典型灌区。北疆三屯河灌区地处天山北坡带头屯河流域南缘, 87°18'E、44°01'N, 新疆膜下滴灌主要灌区。海拔 600~700 m, 年均降水 181.7 mm、蒸发 1739.1 mm、日照 7.8 h, 气温 13.1°C, 属典型内陆干旱气候。分布棕漠土, 土壤质地多以轻、中壤, 耕作层土壤容重 1.50~1.60 g/cm³, 田间持水量 20.1%~23.4%。地下水埋深 4 m 以下, 耕层土壤全盐 0.12%无盐渍化, pH 值 8 呈碱性。土壤水分监测 6 处: 灌溉中心试验站(昌吉市滨湖镇 13 户村), 地下廊道自动监测土豆、大豆、谷子、油菜、胡萝卜、苜蓿滴灌作物; 昌吉市榆树沟镇曙光村葡萄滴灌; 勇进村冬麦畦灌和甜菜滴灌; 滨湖永红村冬麦畦灌; 三工乡庙工村棉花滴灌; 佃坝镇二畦村棉花滴灌。东疆高昌灌区位于天山东南吐鲁番盆地, 89°12'E、42°56'N, 海拔 500 m, 年均降水 15.8 mm、蒸发 2551.7 mm、日照 8.3 h, 气温 14.2°C, 属暖温带大陆极端干旱荒漠气候。主要种植葡萄、哈密瓜, 棉花作物。土壤质地多戈壁细砂和沙壤, 重壤和粘土分布少。耕作层土壤容重 1.48~1.55 g/cm³, 40 cm 以下土壤容重 1.55 g/cm³ 以上。灌溉多常规沟畦灌, 近年滴灌有较快发展。田间土壤水分监测三处: 高昌区三堡乡英吐尔村葡萄沟灌、恰特喀勒乡拜什巴拉村葡萄沟灌、阿吉能坎儿孜村甜瓜膜下滴灌。南疆于田灌区地处塔克拉玛干沙漠南昆仑山北, 81°40'E、36°52'N, 海拔 1300~1450 m, 年均降水 48.3 mm、蒸发 2309.7 mm、日照 7.7 h, 气温 11.7°C, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 4208.1°C, 属暖温带内陆干旱荒漠气候。土壤质地以沙壤或粉沙壤为主, 土壤容重 1.40~1.50 g/cm³,

田间持水量 20%~27%。灌区主要种植核桃、红枣、葡萄、杏等林果，多以果树套种粮作，近年滴灌有所应用，农田土壤水分监测点于田斯也克乡灌区。

2.2. 监测内容

灌溉期农田土壤水分定点自动观测，灌溉中心试验站，水分传感器埋设地下廊道测区，每 2 h 自动监测土壤 0~140 cm，每层 20 cm 体积含水率；三屯河、东疆高昌、南疆于田灌区，采用国产 E 生态固定智能式土壤墒情仪，监测深度 100 cm，每 10 cm 采样，1 h 采集信息自动上传。测点行政区、作物灌溉、灌区类型、土壤质地等情况见表 1。

Table 1. Basic information of soil moisture monitoring points in typical irrigation districts

表 1. 典型灌区土壤水分监测点基本信息

典型 片区	监测代表区	农田代表监测点		作物及灌溉方式	灌区 类型	土壤 质地	观测 年限
		乡镇	村队				
北疆三屯 河流域	试验站	滨湖镇	13 户村	土豆、大豆、谷子、油菜、 胡萝卜、苜蓿滴灌	井水灌溉	中壤、重壤	2016~2017 年
	三屯河灌区	滨湖镇、榆树沟镇、曙光村、勇进村、永红三工乡、灌佃坝镇	村、庙工村、二畦村	葡萄滴灌、冬麦畦灌、 甜菜滴灌、棉花滴灌	地表水、 地下水	壤质土， 多为中壤	2017~2018 年
东疆 吐鲁番	高昌区	三堡乡、 恰特喀勒乡	英吐尔村、拜什巴拉村、 阿吉能坎儿孜村	葡萄沟灌、葡萄沟灌、 甜瓜膜下滴灌	井水灌溉	戈壁细砂 和沙壤土	2017~2018 年
南疆灌区	于田灌区	斯也克乡	斯也克村	核桃套种小麦常规畦灌	地表水 自流灌	沙壤土、 粉沙壤土	2017~2018 年

2.3. 分析方法

土壤湿度(相对含水率)，按下式计算：

$$S = (\beta/\theta) \times 100\% \quad (1)$$

式中：S 为土壤湿度，%； β 为监测点土壤含水率，%； θ 为田间持水量，%。

不同含水率情况下土壤贮水量，按下式分析：

$$W = 10\gamma H \sum_{i=1}^n \beta \quad (2)$$

式中：W 为土壤贮水量，mm； γ 为土壤容量， g/cm^3 ；H 为土壤层深，cm；i、n 为不同土壤层观测次数； β 为土壤重量含水率，%。

土壤有效水分(贮存土壤中可为作物吸收利用水量)，按下式分析：

$$w = 10\gamma H \sum_{i=1}^n \theta(1-k) \quad (3)$$

式中：w 为土壤有效水分，mm； γ 为土壤容量， g/cm^3 ；H 为土壤层深，cm；i、n 为不同土壤层观测次数； θ 为田间持水量，%；k 为占田间持水量的百分率，%。一般占田间持水量的 60% 以上，即 $k = 0.6\theta$ 。

有效水分出现率，即作物灌溉期农田土壤有效水分出现概率，按下式分析：

$$F = 1 - x(\leq X) \quad (4)$$

式中：F 为有效水分出现系数；x 为有效水分出现次数；X 为样本总数量，个。

灌水定额，某次灌水前、后土壤含水率变化差，按下式分析：

$$m = 10\gamma H \sum_{i=1}^n (\beta_2 - \beta_1) \quad (5)$$

式中： m 为灌水定额，mm； γ 为土壤容量， g/cm^3 ； H 为作物灌溉湿润层深，cm； i 、 n 为不同土壤层次数； β_2 为灌水后深度土壤重量含水量，%； β_1 为灌水前深度土壤重量含水量，%。

应用统计学基本方法[32]，进行数据变量集中趋势、离散程度、分布特征检验，采用 Excel 2007 系统工具软件图表绘制分析。

3. 结果与分析

3.1. 田间土壤水分特征

对典型灌区作物灌溉生长期，两年 14 处定点监测形成的 705,950 个土壤含水率数据(北疆典型灌区试验站监测点 6 处 240,440 个数据，三屯河流域监测点 4 处 291,640 个数据；东疆吐鲁番高昌区监测点 3 处 51010 个数据；南疆于田灌区监测点 1 处 122,860 个数据)，进行灌溉土壤水分效应综合研析。图 1~图 3 分别为部分北疆试验站土豆滴灌，三屯河葡萄滴灌、东疆吐鲁番高昌区葡萄沟灌、南疆于田灌区核桃套种小麦常规畦灌，监测点灌溉期土壤含水率过程线。由图可以看出，灌溉期农田土壤水分具有明显三个特征：1) 每次灌水土壤含水率消长类似正弦函数波动变化。2) 滴灌作物灌水定额较小，常规沟灌灌水定额相对较大，因此滴灌作物土壤含水率波动周期短小，常规沟灌土壤含水率波动周期相对大。3) 不同灌溉方式土壤剖面土壤含水率大、小分布不同，滴灌土壤含水率耕作层(0~20 cm)相对较大，土壤水分干湿交替消长较频繁，耕作层(30~40 cm)及以下土壤含水率，由于小定额灌水量下渗水量有限，土壤含水率虽然不高但却相对稳定，常规沟灌耕作层与滴灌类似，但耕作层以下，由于较大灌水定额下渗水量较多，土壤含水率较高且相对稳定。不同灌溉方式农田土壤含水率变化分布，与灌溉制度有关并影响灌水质量及作物生长效果，对监测点土壤含水率 95%置信区间统计检验(表 2~表 5)表明，北疆试验站监测点在 20~40 cm 土层，土壤含水率最大和最小值为 42.6%和 21.3%，平均 27.5%~29.2%，标准差 4.3~3.9。60 cm 及以下土层含水率最大和最小值为 46.6%和 23.5%，平均 31.9%~39.4%，标准差 3.2~2.4；北疆三屯河灌区监测点 10~40 cm 土层，土壤含水率最大和最小值为 34.6%和 9.9%，平均 19.2%~23.1%，标准差 5.1~2.9。50 cm 以下土层，土壤含水率最大和最小值为 33.9%和 16.3%，平均 22.1%~29.3%，标准差 3.1~3.3。

东疆吐鲁番高昌灌区监测点 10~40 cm 土层，土壤含水率最大和最小值为 38.1%和 12.5%，平均 21.2%~32.3%，标准差 5.3~3.1。50 cm 及以下土层，土壤含水率最大和最小值为 39.8%和 28.0%，平均 32.8%~34.5%，标准差 2.6~2.1。

南疆于田灌区监测点 10~40 cm 土层，土壤含水率最大和最小值为 37.4%和 7.4%，平均 19.7%~25.3%，标准差 6.1~3.2。50 cm 及以下土层，土壤含水率最大和最小值为 30.7%和 14.4%，平均 22.2%~24.2%，标准差 3.6~2.9。

综上统计分析说明，灌溉农田土壤含水率变化，耕作层(0~40 cm)虽然土壤质地不同，但土壤含水率及标准差均具有变化较大共性，而壤质类含水率变化差异相对沙质类变率小，耕作层以下土壤含水率及标准差变幅减小相对稳定。

3.2. 灌溉水分效应分析

以典型灌区农田灌溉期两年的土壤含水率监测数据，基于式(1)~(4)对土壤含水率、灌溉农田土壤湿度、土壤贮水量、有效水分(占田间持水量 60%以上土壤水量)、有效水分出现率(田间持水量 60%以上土壤含水量观测数占样本总量比率)分析结果如表 6~表 9 所示。

由分析结果看出，北疆试验站监测点 20~140 cm 土层，含水率由 28.5%增至 41.1%，平均 35.1%，土壤湿度由 72.0%增至 93.2%，平均 84.2%，贮水量由 57.0 mm 增至 82.2 mm，平均 70.2 mm，有效水分由

10.9 mm 增至 28.8 mm, 平均 20.7 mm, 有效水出现概率 0.84~1.00, 平均 0.96。全剖面土壤层深有效水分 144.7 mm, 其中, 耕作层 0~40 cm 有效水分 26.3 mm, 占总量 18.2%, 耕作层以下 60~80 cm 有效水分 37.6 mm, 占总量 26.0%, 80 cm 及以下土层有效水分占总量 55.8%; 北疆三屯河灌区监测点 10~100 cm 土层, 含水率由 21.5% 增至 35.6%, 平均 30.2%, 土壤湿度由 53.2% 增至 90.4%, 平均 79.7%, 贮水量由 21.5 mm 增至 35.6 mm, 平均 30.2 mm, 有效水由 -2.4 mm 增至 12.1 mm, 平均 7.5 mm, 有效水出现概率 0.43~1.00, 平均 0.88。全剖面土壤层深有效水分 74.9 mm, 其中, 耕作层 0~40 cm 有效水分 13.4 mm, 占总量 17.9%, 耕作层以下 50~80 cm 有效水分 36.6 mm, 占总量 48.9%, 80 cm 及以下土层有效水分占总量 33.2%。

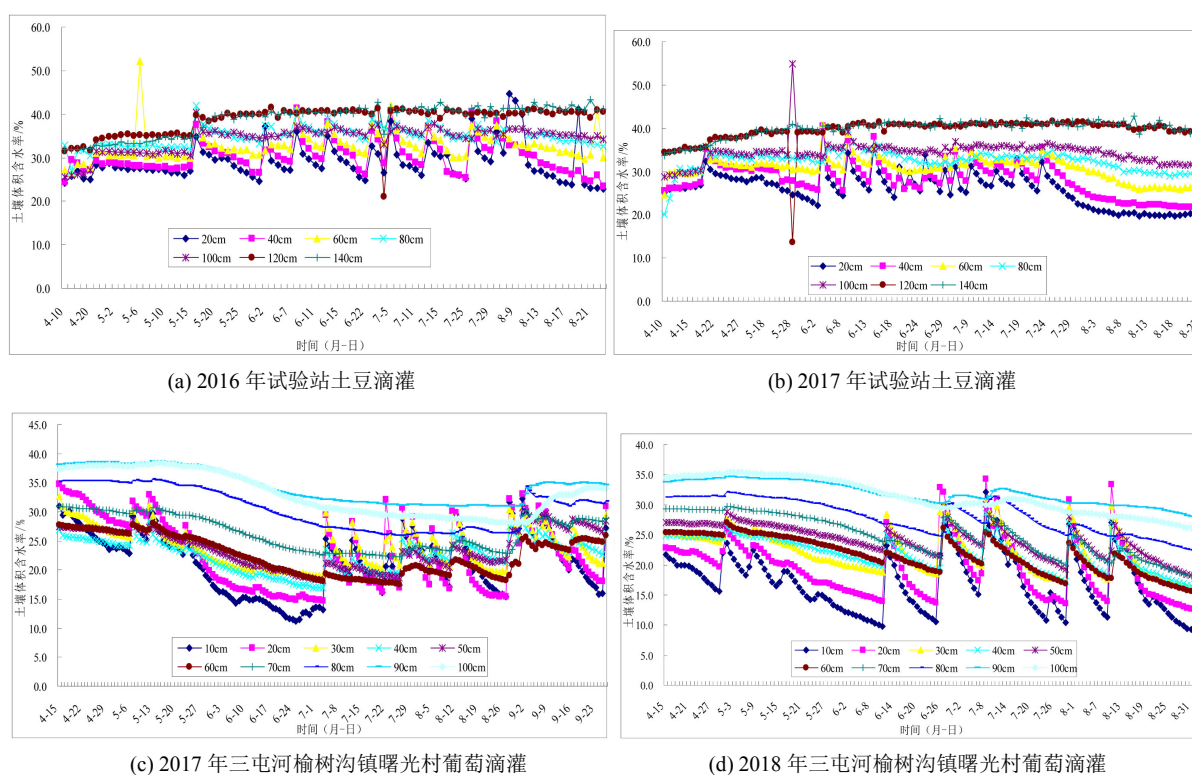


Figure 1. Soil moisture content of irrigation area in some typical irrigation areas in Northern Xinjiang

图 1. 北疆典型灌区(部分)监测点灌溉期土壤含水率

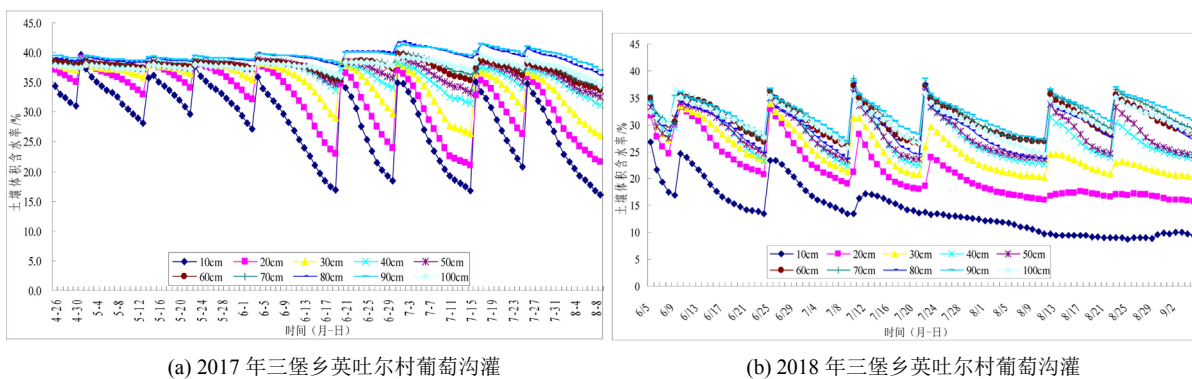


Figure 2. Soil moisture content at irrigation site of Turpan Gaochang irrigation area (part) in eastern Xinjiang

图 2. 东疆吐鲁番高昌灌区(部分)监测点灌溉期土壤含水率

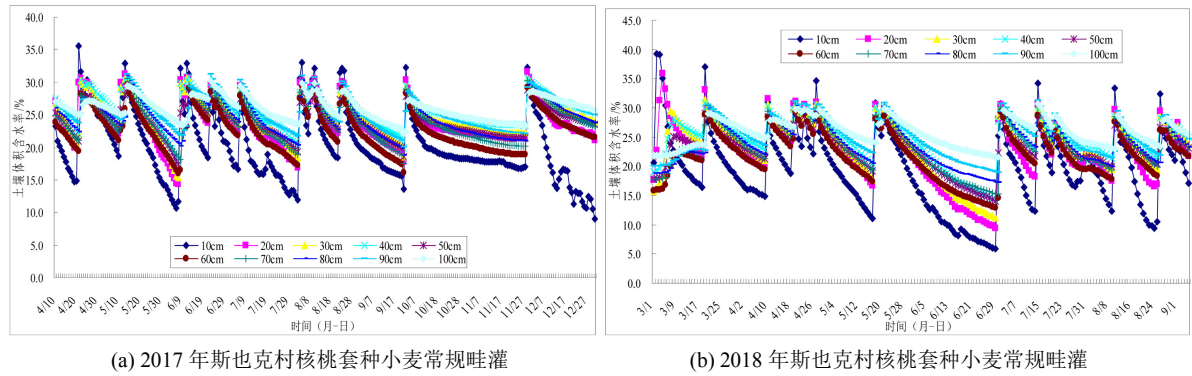


Figure 3. Soil moisture content at irrigation site of monitoring area in Yutian irrigation area, southern Xinjiang
图 3. 南疆于田灌区(部分)监测点灌溉期土壤含水率

Table 2. 95% confidence level test of soil moisture in 2016-2017 years (part) monitoring stations in North Xinjiang experimental station

表 2. 北疆试验站 2016~2017 年(部分)监测点土壤含水率 95%置信度统计检验

代表区、作物灌溉	分析项目	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm
试验区土豆滴灌	平均/%	27.5	29.2	31.9	33.7	34.3	39.1	39.4
	标准误差	0.5	0.4	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3
	中位数/%	27.0	28.5	31.9	34.0	35.0	40.3	40.4
	众数/%	27.4	16.4	16.5	34.3	18.4	40.6	20.7
	标准差	4.3	3.9	3.2	2.4	2.4	2.6	2.7
	方差	18.2	14.8	10.5	5.6	6.0	7.1	7.6
	峰度	1.5	0.6	5.0	4.2	1.4	5.0	0.6
	偏度	0.9	0.7	1.2	-0.8	-1.2	-2.0	-1.3
	区域/%	21.3	18.4	21.0	17.4	12.6	13.9	10.3
	最小值/%	21.3	22.6	25.7	23.5	27.2	27.7	32.8
	最大值/%	42.6	41.0	46.6	40.9	39.7	41.6	43.1
	观测数组	193	193	193	193	193	193	193

Table 3. 95% confidence level test of soil moisture content in 2017-2018 years (part) monitoring points of Santun River irrigation area in North Xinjiang

表 3. 北疆三屯河灌区 2017~2018 年(部分)监测点土壤含水率 95%置信度统计检验

代表区、作物灌溉	分析项目	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	80 cm
榆树沟镇曙光村, 葡萄滴灌	平均/%	19.2	21.2	23.1	22.3	24.0	22.1	29.3
	标准误差	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3
	中位数/%	19.1	20.8	22.9	22.7	23.9	21.9	29.6
	众数/%	21.8	21.6	26.8	24.4	27.2	26.4	33.4
	标准差	5.1	5.5	3.7	2.9	3.1	3.2	3.3
	方差	26.5	30.3	13.1	8.1	9.7	10.3	10.6
	峰度	-0.7	-0.6	-1.0	-0.8	-1.0	-1.3	-1.5
	偏度	0.2	0.5	0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1
	区域/%	22.4	21.1	14.2	12.5	12.7	11.3	10.1
	最小值/%	9.9	13.5	17.4	16.4	17.9	16.3	23.9
	最大值/%	32.3	34.6	31.6	28.9	30.4	27.6	33.9
	观测数组	307	307	307	307	307	307	307

Table 4. Statistical test of soil water content 95% confidence of 2017-2018 years (partial) monitoring points in typical irrigation areas in eastern Xinjiang**表 4.** 东疆典型灌区 2017~2018 年(部分)监测点土壤含水率 95%置信度统计检验

代表区、作物灌溉	分析项目	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	80 cm
吐鲁番高昌区, 三堡乡英吐尔村, 葡萄沟灌	平均/%	21.2	26.7	29.9	32.3	32.8	34.3	34.5
	标准误差	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3
	中位数/%	21.8	26.8	30.1	32.3	32.7	34.3	34.7
	众数/%	20.5	26.8	32.2	32.1	35.3	34.4	35.5
	标准差	5.3	5.1	3.7	3.1	2.6	2.1	2.2
	方差	29.1	25.2	13.9	10.6	7.6	5.1	6.3
	峰度	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	0.3	0.0
	偏度	0.2	0.2	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-0.1
	区域/%	20.8	17.9	13.2	11.4	9.8	8.7	9.9
	最小值/%	12.5	18.4	23.2	26.8	28.0	29.9	29.9
	最大值/%	33.2	36.2	36.4	38.1	37.8	38.5	39.8
	观测数/组	198	198	198	198	198	198	198

Table 5. Statistical test of soil water content 95% confidence for 2017-2018 years (partial) monitoring points in typical irrigation areas in southern Xinjiang**表 5.** 南疆典型灌区 2017~2018 年(部分)监测点土壤含水率 95%置信度统计检验

代表区、作物灌溉	分析项目	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	80 cm
于田灌区, 斯也克村核桃套种 小麦常规畦灌	平均/%	19.7	23.2	24.1	25.3	23.6	22.2	24.2
	标准误差	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2
	中位数/%	19.0	23.0	24.3	25.5	23.8	22.2	24.0
	众数/%	18.4	26.1	24.2	26.7	22.5	20.9	23.4
	标准差	6.1	4.4	3.8	3.2	2.9	3.6	3.1
	方差	37.0	20.0	15.3	10.5	8.8	12.9	9.4
	峰度	0.1	-0.2	0.0	0.1	-0.3	-0.7	-1.0
	偏度	0.5	-0.1	-0.5	-0.5	-0.4	0.0	0.2
	区域/%	30.1	21.8	17.8	14.9	13.3	15.0	12.6
	最小值/%	7.4	12.0	13.3	16.0	15.8	14.4	18.1
	最大值/%	37.4	33.8	31.0	30.8	29.0	29.5	30.7
	观测数/组	444	444	444	444	444	444	444

Table 6. Irrigation water effect analysis of 2016-2017 years in North Xinjiang irrigation station**表 6.** 北疆灌区试验站 2016~2017 年灌溉水分效应分析

土层/cm	土豆滴灌(中壤)					大豆滴灌(中壤)				
	含水率 /%	土壤湿度 /%	贮水量 /mm	有效水 /mm	有效水出现率 /%	含水率 /%	土壤湿度 /%	贮水量 /mm	有效水 /mm	有效水出现率 /%
20	27.5	64.6	55.0	4.0	0.71	28.0	69.3	56.1	11.2	0.88
40	29.1	71.1	58.3	9.2	0.88	33.2	76.3	66.4	14.1	0.99
60	31.9	74.3	63.8	12.9	0.98	36.0	83.5	72.0	20.1	1.00
80	33.7	82.4	67.4	18.4	1.00	36.5	87.0	73.0	22.7	1.00
100	34.4	86.6	68.8	21.7	1.00	37.2	85.0	74.5	21.9	1.00
120	39.0	93.9	78.1	28.2	1.00	40.9	94.3	81.9	29.7	1.00
140	39.3	91.3	78.7	27.0	1.00	42.8	92.9	85.7	30.3	1.00

Continued

土层/cm	谷子滴灌(中壤)					油菜滴灌(中壤)				
	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%
20	29.6	76.0	59.2	16.9	0.85	29.1	77.6	58.3	13.2	0.96
40	32.2	80.2	64.5	19.4	0.95	36.7	89.1	73.5	24.0	1.00
60	30.3	78.5	60.7	14.0	0.88	33.9	86.8	67.8	20.9	1.00
80	35.5	87.1	71.0	22.7	0.96	37.7	91.9	75.4	26.2	1.00
100	35.5	86.5	71.0	22.8	1.00	35.0	90.8	70.0	23.8	1.00
120	40.0	93.4	80.0	28.9	1.00	41.2	96.5	82.5	31.2	1.00
140	39.9	94.9	79.8	27.2	1.00	42.1	95.2	84.2	31.1	1.00
土层/cm	胡萝卜滴灌(中壤)					苜蓿滴灌(中壤)				
	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%
20	27.4	69.2	54.8	7.3	0.77	29.2	75.2	58.4	13.1	0.89
40	29.9	73.5	59.8	11.0	0.84	29.4	79.6	58.9	14.8	0.92
60	32.3	80.2	64.6	16.2	0.89	33.2	82.8	66.4	18.3	0.96
80	30.6	75.6	61.3	18.5	1.00	32.2	78.5	64.4	14.8	0.95
100	39.7	84.5	79.5	22.8	1.00	35.6	89.1	71.3	23.2	1.00
120	42.1	87.9	84.2	26.4	1.00	41.3	96.4	82.7	31.2	1.00
140	41.0	88.7	82.1	26.1	1.00	41.2	95.9	82.5	30.9	1.00
土层/cm	总体平均									
	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%					
20	28.5	72.0	57.0	10.9	0.84					
40	31.8	78.3	63.5	15.4	0.93					
60	32.9	81.0	65.9	17.1	0.95					
80	34.4	83.8	68.8	20.5	0.99					
100	36.2	87.1	72.5	22.7	1.00					
120	40.8	93.7	81.6	29.3	1.00					
140	41.1	93.2	82.2	28.8	1.00					
Σ			491.4	144.7						
平均	35.1	84.2	70.2	20.7	0.96					

Table 7. Irrigation water effect analysis of irrigated area in Santun River Basin in North Xinjiang in 2017-2018 years

表 7. 北疆三屯河流域灌区 2017~2018 年灌溉水分效应分析

土层/cm	葡萄滴灌(中壤、重壤)					冬麦畦灌(中壤、重壤)				
	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%
10	19.1	59.3	19.1	-0.2	0.48	33.4	63.0	33.4	1.7	0.54
20	21.2	61.4	21.2	0.5	0.47	39.5	74.6	39.5	7.7	0.75
30	23.1	73.3	23.1	4.2	0.89	37.6	75.3	37.6	7.7	0.80
40	22.3	77.2	22.3	5.0	0.95	38.4	79.1	38.4	9.3	0.93
50	24.0	78.8	24.0	5.7	0.99	39.1	81.4	39.2	10.3	0.91
60	22.1	80.1	22.1	5.5	0.99	41.4	86.3	41.4	12.6	1.00
70	25.6	84.3	25.6	7.4	1.00	44.8	89.8	44.8	14.9	1.00
80	29.2	86.4	29.3	8.9	1.00	43.1	88.5	43.2	14.0	1.00

Continued

90	33.1	90.3	33.1	11.1	1.00	50.2	92.6	50.2	17.7	1.00
100	32.2	87.4	32.2	10.1	1.00	53.5	94.0	53.6	19.4	1.00
	甜菜滴灌(中壤、重壤)					棉花滴灌(中壤质)				
土层/cm	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%
10	15.4	42.6	15.4	-6.7	0.41	18.1	48.0	18.1	-4.5	0.32
20	23.8	68.1	23.8	2.7	0.64	23.5	67.1	23.5	2.5	0.66
30	26.7	76.7	26.7	5.8	0.86	24.6	72.3	24.6	4.1	0.75
40	28.5	81.8	28.5	7.6	1.00	28.9	77.7	29.0	6.3	0.91
50	28.4	82.3	28.4	7.7	1.00	31.2	85.9	31.2	9.2	1.00
60	26.3	83.0	26.3	7.4	1.00	28.3	85.7	28.3	8.1	1.00
70	26.9	84.3	26.9	7.9	1.00	27.7	90.0	27.7	9.2	1.00
80	27.9	86.7	27.9	8.8	1.00	27.5	88.5	27.5	8.9	1.00
90	32.7	93.7	32.8	11.8	1.00	32.1	89.3	32.1	10.5	1.00
100	31.0	91.8	31.0	10.7	1.00	25.7	88.4	25.8	8.3	1.00
	总体平均									
土层/cm	含水率/%		土壤湿度/%		贮水量/mm		有效水/mm		有效水出现率/%	
10	21.5		53.2		21.5		-2.4		0.43	
20	27.0		67.8		27.0		3.4		0.63	
30	28.0		74.4		28.0		5.4		0.82	
40	29.5		79.0		29.5		7.0		0.95	
50	30.7		82.1		30.7		8.2		0.98	
60	29.5		83.8		29.5		8.4		1.00	
70	31.2		87.1		31.3		9.8		1.00	
80	31.9		87.5		31.9		10.2		1.00	
90	37.0		91.5		37.0		12.8		1.00	
100	35.6		90.4		35.6		12.1		1.00	
Σ					302.2		74.9			
平均	30.2		79.7		30.2		7.5		0.88	

Table 8. Irrigation water effect analysis of 2017-2018 years in Turpan Gaochang irrigation area in eastern Xinjiang
表 8. 东疆吐鲁番高昌灌区 2017~2018 年灌溉水分效应分析

土层/cm	葡萄沟灌(粘土)					葡萄沟灌(砂壤)					甜瓜膜下滴灌(砂壤)				
	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%
10	21.2	59.2	21.2	1.3	0.45	12.2	46.8	12.2	3.0	0.72	19.9	52.5	19.9	-3.1	0.31
20	26.6	72.8	26.6	4.9	0.71	17.4	74.5	17.4	3.7	0.96	21.4	61.6	21.4	0.4	0.49
30	29.9	81.7	29.9	8.1	0.99	22.6	78.8	22.7	5.3	1.00	24.6	68.2	24.6	2.8	0.66
40	32.3	84.6	32.3	9.4	1.00	22.1	78.1	22.1	5.1	1.00	25.3	70.8	25.3	3.6	0.72
50	32.7	86.3	32.7	10.1	1.00	23.9	85.1	23.9	6.4	1.00	28.3	76.2	28.3	5.8	1.00
60	34.2	89.1	34.3	11.1	1.00	22.7	78.1	22.7	5.2	1.00	32.4	84.1	32.4	9.0	1.00
70	34.6	88.4	34.6	11.1	1.00	24.6	81.6	24.6	6.5	1.00	34.8	86.4	34.8	10.5	1.00
80	34.5	88.7	34.5	10.7	1.00	20.0	85.5	20.0	5.9	1.00	36.9	88.5	37.0	11.8	1.00

Continued

90	35.9	89.1	35.9	12.0	1.00	26.9	91.5	26.9	9.2	1.00	33.9	84.4	33.9	9.8	1.00
100	34.2	87.6	34.3	11.5	1.00	29.8	92.3	29.8	10.4	1.00	38.6	88.9	38.6	12.5	1.00
总体平均															
土层/cm	含水率/%		土壤湿度/%		贮水量/mm		有效水/mm		有效水出现率/%						
10	17.8		52.8		17.8		0.4		0.49						
20	21.8		69.6		21.8		3.0		0.72						
30	25.7		76.2		25.7		5.4		0.88						
40	26.6		77.8		26.6		6.1		0.91						
50	28.3		82.5		28.3		7.4		1.00						
60	29.8		83.8		29.8		8.4		1.00						
70	31.3		85.5		31.4		9.4		1.00						
80	30.5		87.6		30.5		9.5		1.00						
90	32.2		88.3		32.3		10.3		1.00						
100	34.2		89.6		34.2		11.4		1.00						
Σ					278.3		71.3								
平均	27.8		79.4		27.8		7.1		0.90						

Table 9. Analysis of irrigation water effect in Yutian irrigation area in southern Xinjiang for 2017-2018 years
表 9. 南疆于田灌区 2017~2018 年灌溉水分效应分析

土层/cm	核桃套种小麦常规畦灌(沙壤、粉砂壤)				
	含水率/%	土壤湿度/%	贮水量/mm	有效水/mm	有效水出现率/%
10	19.6	52.7	19.7	-2.8	0.30
20	23.2	69.3	23.2	3.0	0.78
30	24.1	77.7	24.1	5.5	0.92
40	25.2	81.8	25.2	6.7	0.96
50	23.6	81.4	23.6	6.2	0.96
60	22.2	75.5	22.2	4.6	0.93
70	23.8	77.6	23.8	5.4	0.98
80	24.2	78.9	24.2	5.8	1.00
90	25.4	81.0	25.4	6.6	1.00
100	25.9	84.8	25.9	7.6	1.00
Σ	237.2	760.7	237.3	48.5	8.80
平均	23.7	76.1	23.7	4.9	0.88

东疆吐鲁番高昌灌区监测点 10~100 cm 土层, 含水率由 17.8% 增至 34.2%, 平均 27.8%, 土壤湿度由 52.8% 增至 89.6%, 平均 79.4%, 贮水量由 17.8 mm 增至 34.2 mm, 平均 27.8 mm, 有效水分由 0.4 mm 增至 11.4 mm, 平均 7.1 mm, 有效水分出现概率 0.49~1.00, 平均 0.90。全剖面土壤层深有效水分 71.3 mm, 其中, 耕作层 0~40 cm 有效水分 14.9 mm, 占总量 20.9%, 耕作层以下 50~80 cm 有效水分 34.7 mm, 占总量 48.7%, 80 cm 及以下土层有效水分占总量 30.4%。

南疆于田灌区监测点 10~100 cm 土层, 含水率由 19.6% 增至 25.9%, 平均 23.7%, 土壤湿度由 52.7% 增至 84.8%, 平均 76.1%, 贮水量由 19.7 mm 增至 25.9 mm, 平均 23.7 mm, 有效水由 -2.8 mm 增至 7.6 mm, 平均 4.9 mm, 有效水出现概率 0.30~1.0, 平均 0.88。全剖面土壤层深有效水分 48.5 mm, 其中, 耕作层 0~40 cm 有效水分 12.4 mm, 占总量 25.6%, 耕作层以下 50~80 cm 有效水分 22.0 mm, 占总量 45.4%, 80

cm 及以下土层有效水分占总量的 29.0%。

综上灌溉水分效应看出, 土壤含水率、土壤湿度、贮水量、有效水分及出现率, 随着土壤层深递增, 表层土壤水分小变率大, 中层土壤水分逐步增大, 下层土壤水分增大且保持相对稳定, 灌溉水分可以满足作物需水, 且有一定有效水分保持。土壤有效水贮量与灌溉模式和土壤质地有关, 壤质类土好于沙质土, 滴灌耕层土壤水分好于地面畦灌, 中层及以下水分贮存和有效水分均有稳定保持。

3.3. 田间用水定额分析

以典型灌区测点土壤含水率由式(5)分析的田间用水定额(表 10~表 13)可知, 北疆灌区试验站中壤, 不同作物滴灌田间用水定额 34~60 mm, 平均 44 mm, 土壤剖面 0~20 cm 土层灌溉水 18 mm, 占用水定额 40.9%, 40 cm 土层灌溉水 10 mm, 占用水定额 22.8%, 60 cm 土层灌溉水 8 mm, 占用水定额 18.2%, 60 cm 及以下土层灌溉水入渗甚少趋于零; 北疆三屯河灌区中壤、重壤土, 冬麦畦灌田间用水定额 57 mm, 不同作物滴灌田间用水定额 37~46 mm, 平均 40 mm, 土壤剖面 0~20 cm 土层田间灌溉水, 畦灌和滴灌平均分别为 34 mm、24 mm, 占用水定额的 59.6%和 60.0%, 30~50 cm 土层灌溉水, 分别为 18 mm、13 mm, 占用水定额的 31.6%和 32.5%, 60 cm 土层及以下灌溉水, 分别占用水定额的 8.8%和 7.5%, 田间灌溉水入渗甚少并趋于零。

Table 10. Irrigation quota for loam soil in 2016-2017 years in experimental station of North Xinjiang irrigation area (mm)

表 10. 北疆灌区试验站 2016~2017 年中壤土田间用水定额(mm)

土层/cm	土豆滴灌	大豆滴灌	谷子滴灌	油菜滴灌	胡萝卜滴灌	苜蓿滴灌	滴灌平均
20	18	21	20	17	14	20	18
40	16	17	7	4	8	11	10
60	9	11	12	9	5	4	8
80	4	5	3	3	5	1	3
100	3	3	3	2	0	2	2
120	2	3	0	0	1	0	1
140	0	0	0	0	0	0	0
Σ	52	60	45	35	34	38	44

Table 11. Irrigation quota for soil and heavy loam in Santun River irrigation area in North Xinjiang for 2017-2018 years (mm)

表 11. 北疆三屯河灌区 2017~2018 年中壤、重壤土田间用水定额(mm)

土层/cm	冬麦畦灌	葡萄滴灌	棉花膜下滴灌	甜菜膜下滴灌	滴灌平均
10	20	10	23	7	13
20	14	10	14	8	11
30	9	7	6	7	6
40	5	5	3	4	4
50	4	3	1	4	3
60	2	2	0	2	1
70	1	1	0	2	1
80	0	0	0	1	0
90	0	0	0	1	0
100	0	0	0	1	0
Σ	57	38	46	37	40

Table 12. Field irrigation quota for 2017-2018 years in Turpan Gaochang irrigation area in eastern Xinjiang (mm)
表 12. 东疆吐鲁番高昌灌区 2017~2018 年田间用水定额(mm)

土层/cm	葡萄沟灌粘土	葡萄沟灌沙壤	甜瓜膜下滴灌沙壤	葡萄沟灌平均
10	10	4	6	7
20	8	5	5	7
30	5	6	4	5
40	4	6	3	5
50	3	6	2	4
60	3	8	1	5
70	2	7	0	5
80	2	4	0	3
90	1	3	0	2
100	1	3	0	2
Σ	39	51	22	45

Table 13. Field irrigation quota for walnut interplanting wheat with border irrigation and light sand soil in 2017-2018 years in Yutian irrigation area, southern Xinjiang

表 13. 南疆于田灌区 2017~2018 年核桃套种小麦畦灌轻沙壤田间用水定额

土层/cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	90 cm	100 cm	Σ
灌溉用水定额/mm	10	10	7	5	3	2	1	0	0	0	38

东疆吐鲁番高昌灌区粘性及沙壤土质葡萄沟灌, 田间用水定额 39~51 mm, 平均 45 mm, 甜瓜膜下滴灌沙壤用水定额 22 mm。土壤剖面 0~20 cm 土层田间灌溉水, 葡萄沟灌和甜瓜滴灌平均分别为 14 mm、11 mm, 占用水定额 31.1%和 50.0%, 30~50 cm 土层灌溉水, 分别为 14 mm、9 mm, 占用水定额的 31.1%和 40.9%, 60 cm 土层及以下灌溉水, 分别占用水定额的 37.8 和 9.1%, 常规沟灌下层土壤灌溉水比滴灌明显增加, 下层土壤层滴灌作物水入渗甚少趋于零。南疆于田灌区核桃套种小麦畦灌轻沙壤, 田间用水定额 38 mm, 土壤剖面 0~20 cm 土层田间灌溉水 20 mm, 占用水定额 52.6%, 30~50 cm 土层灌溉水 15 mm, 占用水定额 39.5%, 60 cm 土层及以下灌溉水占用水定额 7.9%, 70 cm 以下入渗甚少趋于零。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

典型灌区滴灌、常规沟畦灌及不同土壤质地田间土壤含水率监测分析, 初步获得干旱区农田灌溉水分配效应评析成果: 灌水前后农田土壤含水率消长类似正弦函数波动, 田间水分变化基本符合作物生长需求。灌溉期土壤湿度呈现耕作层至下层明显增加, 60%以上土壤湿度分布广泛, 农田土壤湿润较好利于作物生长。农田土壤贮水量、有效水分存量概率 0.80 以上, 土壤有效水随土壤层深而递增, 0~30 cm 上层保存少, 40 cm 及以下保持增多, 有利于作物汲取深层土壤水分。北疆灌区中壤、重壤土, 滴灌田间用水定额 42 mm, 畦灌 57 mm; 东疆吐鲁番高昌灌区粘性及沙壤土质葡萄沟灌, 田间用水定额 45 mm, 滴灌沙壤田间用水定额 22 mm; 南疆于田灌区核桃套种小麦畦灌轻沙壤, 田间用水定额 38 mm。

4.2. 讨论

本文基于典型灌区土壤含水率监测信息运用灌溉理论及数理统计检验, 对滴灌、常规沟畦灌溉进行土壤湿度、土壤贮水量、有效水分利用率、田间用水定额分析评估, 结果反映了灌区作物灌溉用水效果, 为干旱灌区用水管理提供了参考依据。本研究采用国产智墒仪监测农田土壤含水率, 经监测信息梳理还

存在一些数据异常或不稳定现象, 经分析存在原因: 有些传感器田间埋深与坚实度不足, 田间传感器受人为或耕作、取出收回等扰动影响, 因此, 加强农田传感器安装管护尤显重要。

基金项目

新疆水利科技推广专项(T 2016 030)。

参考文献

- [1] 史克滨, 田军仓, 刘庆华. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 25-129.
- [2] 靳宇蓉, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于稳定同位素的土壤水分运动特征[J]. 土壤学报, 2015(4): 792-801.
- [3] 串志强, 盛钰, 赵成义, 等. 膜下滴灌条件下绿洲棉田土壤水分运动数值模拟[J]. 干旱区地理, 2008(5): 673-679.
- [4] Han, D.M. and Zhou, T.T. (2018) Soil Water Movement in the Unsaturated Zone of an Inland Arid Region: Mulched Drip Irrigation Experiment. *Journal of Hydrology*, **12**, 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.012>
- [5] 赵彤, 范严伟, 赵廷红. 水平微润灌土壤水分运动数值模拟与验证[J]. 灌溉排水学报, 2018(3): 28-34.
- [6] 张林, 吴普特, 朱德兰, 等. 多点源滴灌条件下土壤水分运移模拟试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 237-243.
- [7] 张林, 吴普特, 范兴科. 多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 40-45.
- [8] 李坡, 吴飞青, 胡正峰, 等. 节水灌溉中土壤水运动模拟研究[J]. 节水灌溉, 2015(3): 46-51.
- [9] 张珂萌, 牛文全, 薛万来, 等. 间歇和连续灌溉土壤水分运动的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 11-16.
- [10] 张和喜, 袁友波, 舒贤坤, 等. 地下滴灌条件下土壤水分运动研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3277-3279.
- [11] 李道西, 罗金耀. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 26-28.
- [12] 宰松梅, 仵峰, 温季, 等. 大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 51-57.
- [13] 刘晓英, 杨振刚, 王天俊. 滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J]. 水利学报, 1990(1): 11-22.
- [14] 张志刚, 李宏, 李疆, 等. 地表滴灌条件下滴灌量对土壤水分入渗、再分布过程的影响[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(1): 174-181.
- [15] 雷呈刚. 新疆棉田多点源滴灌条件下土壤水分运移特性试验研究[J]. 吉林水利, 2016(3): 18-21.
- [16] 李敏敏, 安贵阳, 郭燕, 等. 不同灌溉方式对渭北果园土壤水分及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011(4): 174-179.
- [17] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 12: 3203-3210.
- [18] 宋淑亚, 刘文兆, 王俊, 等. 覆盖方式对玉米农田土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2012(2): 210-212.
- [19] Kader, M.A., Senge, M., Mojid, M.A., Nakamura, K., *et al.* (2017) Mulching Type-Induced Soil Moisture and Temperature Regimes and Water Use Efficiency of Soybean under Rain-Fed Condition in Central Japan. *International Soil and Water Conservation Research*, **8**, 302-308.
- [20] Yang, J., Mao, X., Wang, K., *et al.* (2017) The Coupled Impact of Plastic Film Mulching and Deficit Irrigation on Soil Water/Heat Transfer and Water Use Efficiency of Spring Wheat in Northwest China. *Agricultural Water Management*, **12**, 232-245.
- [21] 孟春红, 夏军. “土壤水库”储水量的研究[J]. 节水灌溉, 2004(4): 8-10.
- [22] Xu, C., Tao, H., Tian, B., *et al.* (2016) Limited-Irrigation Improves Water Use Efficiency and Soil Reservoir Capacity through Regulating Root and Canopy Growth of Winter Wheat. *Field Crops Research*, **7**, 268-275.
- [23] 李俊, 毕华兴, 李笑吟, 等. 有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007(1): 98-101.
- [24] 俱战省, 郑粉莉, 刘文兆. 黄土高原南部小流域土壤水分时程变化的分层特征及其驱动机制[J]. 干旱地区农业研究, 2013(1): 28-33.
- [25] 高鹭, 陈素英, 胡春胜, 等. 喷灌条件下农田土壤水分的空间变异性研究[J]. 地理科学进展, 2002(6): 609-615.
- [26] 高鹭, 胡春胜, 陈素英. 喷灌条件下冬小麦根系分布与土壤水分条件的关系[J]. 华南农业大学学报, 2006(1): 5-8.

-
- [27] 李朝阳, 夏建华, 王兴鹏. 低压微润灌灌水均匀性及土壤水分分布特性[J]. 节水灌溉, 2014(9): 9-12.
- [28] 吴程, 胡顺军, 赵成义. 塔里木灌区膜下滴灌棉田土壤水分动态与耗水特性[J]. 节水灌溉, 2016(2): 14-17.
- [29] 孔繁宇, 胡同军. 棉田地下滴灌土壤水分变化及需水规律初探[J]. 中国农学通报, 2005(1): 323-325.
- [30] 杨苏龙, 石跃进, 齐宏力, 等. 滴(渗)灌土壤水分移动规律研究初报[J]. 山西农业科学, 1997(1): 47-50.
- [31] 金世杰, 费良军, 傅渝亮. 土壤水分再分布特性研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2016(3): 251-259.
- [32] 张梅琳. 应用统计学(第二版)[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2009: 38-146.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjss@hanspub.org