

梁飞,李云霞,关新元,等.长期大田滴灌对新疆农田水盐环境影响的研究进展[J].华中农业大学学报,2023,42(5):1-11.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.001



姜存仑

**主持人语:**我国新疆地处欧亚腹地,系典型的大陆性气候,日照时间长,降雨量少,昼夜温差大,空气湿度小。新疆独特的地理条件、气候条件和自然资源形成了其农业的3个鲜明特点:绿洲农业、灌溉农业和机械化农业。因而,新疆农业组织化程度高,集团化特色突出,具有较高的管理水平和较强的科技创新和应用能力。为加快推进新疆地区农业农村现代化,传播新疆特色农业的原创性新成果、新技术,促进学科交叉融合,发挥科技服务产业作用,提高农牧业发展整体水平和农业综合生产能力,本刊特设“新疆特色农业”专集,向本领域专家征稿,共采纳综述和研究论文31篇。专集聚焦新疆现代高效农业、生态与环境、水肥一体化、特色林果、畜牧业、智慧农业、生物育种、种质资源、农业机械化等领域研究成果,希望通过本专集的交流 and 分享,为新疆农业发展增添新的智慧、方法和技术,进一步推动新疆地区农业绿色健康快速发展。

## 长期大田滴灌对新疆农田水盐环境影响的研究进展

梁飞<sup>1,2,3</sup>,李云霞<sup>2</sup>,关新元<sup>2</sup>,刘辉<sup>2,3</sup>,尹飞虎<sup>2</sup>

1. 伊犁师范大学资源与环境学院/资源与生态研究所,伊宁 835000;

2. 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所/农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,石河子 832000;

3. 中国农垦节水农业产业技术联盟,石河子 832000

**摘要** 大田滴灌在新疆地区大规模应用取得了非常显著的经济、社会和生态效益,但不同区域应用时,对土壤水盐平衡及地下水动态的影响也各异。为准确掌握长期节水灌溉对新疆农田土壤水盐及地下水埋深的影响,本文系统梳理了新疆大田滴灌的发展历程及取得成效,分析了长期大田滴灌以来耕层土壤水分状况、南北疆的主要灌区农田地下潜水埋深、耕层土壤盐分再分布的变化情况,并从维护新疆水土资源可持续利用角度提出4条对策与建议:“两水”统观统用构建安全地下水位埋深、灌溉洗盐结合维持良好农田耕层、区域统防统治实现区域水土可持续、节水降盐为核心提升区域农业资源利用效率,为进一步开展新疆农业水资源可持续利用提供参考和方向。节水抑盐是新疆农业可持续发展的战略举措,但如何实现干旱盐碱区水土资源的高效利用,探索和遵循水盐平衡这个科学问题值得长久关注。

**关键词** 大田滴灌;水盐平衡;灌溉洗盐;地下水埋深;水土资源;节水抑盐

**中图分类号** S275.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0001-11

“三山夹两盆”形成的封闭地形以及河湖沉积物的成土母质是新疆土壤盐碱形成的客观条件,也是新疆地区干旱少雨的主要原因。据最新数据统计,新疆现有耕地 70 400 km<sup>2</sup>,其中 37.7% 属于盐渍化耕

地<sup>[1-2]</sup>。农业是新疆用水最多的产业,灌溉是新疆农业发展的基础,“荒漠绿洲、灌溉农业”是其显著特点<sup>[3]</sup>。

新中国成立以来,新疆节水灌溉得到了飞速发

收稿日期:2022-09-30

基金项目:中国工程院院士咨询研究项目“新疆灌区农业节水与可持续发展战略研究”(2022-XY-64)

梁飞,E-mail:liangfei13326@126.com

通信作者:尹飞虎,E-mail:nkyfth@sohu.com

展,经历了大水漫灌到沟畦灌—喷灌—膜下滴灌3个阶段,走出了一条借鉴和创新相结合的节水灌溉发展之路<sup>[4]</sup>。特别是1996年新疆生产建设兵团(简称兵团)将滴灌技术应用于大田覆膜棉花灌溉以来,其显著的节水增产效果,使得该项技术在新疆快速发展。截至2021年底,新疆农作物滴灌面积达42 840 km<sup>2</sup>,占新疆耕地总面积60.85%<sup>[1-2]</sup>,已成为全国节水灌溉面积最大的省区,也是世界上大田应用滴灌面积最大的区域。

虽然新疆在滴灌节水技术实施上取得了一定的成就,但大田滴灌改变了原有农田水盐分布<sup>[5]</sup>和径流路线<sup>[6]</sup>,同时干扰了流域原有的水盐循环和地下水补给过程<sup>[7]</sup>,始终影响着区域的水盐平衡。一方面节水灌溉影响地下水埋深,从而降低了表层土壤的积盐速率;另一方面有限灌溉水量不能满足土壤脱盐需求,盐分在湿润区边缘聚集,形成膜间积盐现象,而长期积盐会影响农田水盐平衡。

为准确掌握新疆长期节水灌溉对土壤水盐及地下水埋深的影响,本文通过系统梳理新疆实施大田滴灌以来农田土壤水盐和地下水的变化情况,归纳不同区域的水盐分布特征,分析长期滴灌对生态环境的影响,并提出相应建议,以为推进新疆农田高

效节水灌溉、做好盐碱地等耕地后备资源开发利用提供参考。

## 1 新疆大田滴灌的发展状况

### 1.1 大田滴灌的发展历程

1996年,兵团引进了以色列成套滴灌设备,在八师121团的大田棉花上进行了试验示范<sup>[8]</sup>,滴灌器材国产化研究也取得了突破性进展<sup>[4,9]</sup>,为大田作物应用滴灌技术奠定了基础。1998年以后,新疆开展了一系列试验研究和设备的自主创新,取得了一批具有自主知识产权的设备和技术;应用的作物也由棉花发展到加工番茄、玉米、小麦、甜菜、向日葵等<sup>[10]</sup>。2000—2020年,新疆的节水灌溉面积由15 909.6 km<sup>2</sup>增加到43 333.2 km<sup>2</sup>,增长了1.7倍;其中兵团由3 249.6 km<sup>2</sup>增加到了13 678.6 km<sup>2</sup>,增长了3.2倍(图1A)。2010年以前兵团的北疆师节水灌溉面积发展迅速;2010—2020年兵团的南疆师和自治区发展态势较快(图1B)。

整体上,自大田滴灌技术应用以来,全疆节水灌溉呈现出快速发展态势,节水灌溉耕地占比达60.9%;其中兵团的节水灌溉发展优于自治区,北疆优于南疆和东疆。

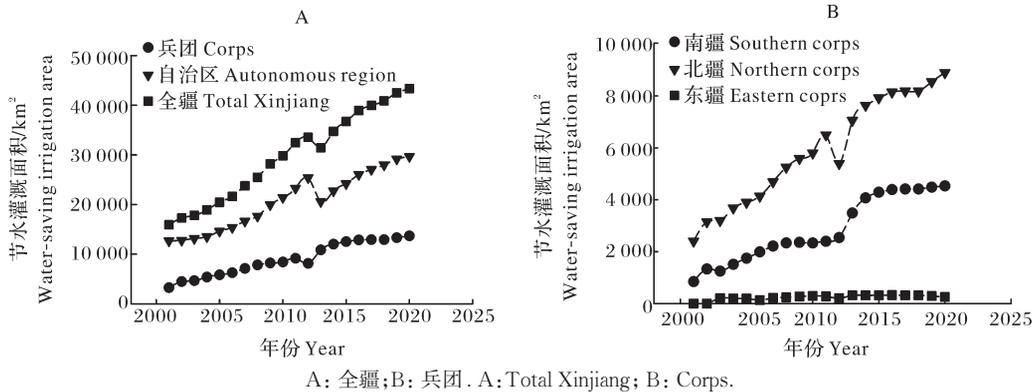


图1 新疆节水灌溉面积现状<sup>[1-2]</sup>

Fig.1 Water-saving irrigation area in Xinjiang<sup>[1-2]</sup>

### 1.2 大田滴灌的发展成效

新疆大田滴灌技术的大规模推广和应用,取得了显著的经济、社会和生态效益。农田毛用水量从2000年的12 535 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>下降至2020年的8 205 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,其中新疆小麦产量在7 500~9 000 kg/hm<sup>2</sup>水平,灌溉定额由6 300~6 700 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>减少到4 500~4 800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,节水25%~30%<sup>[11]</sup>;玉米产量在15 000~18 000 kg/hm<sup>2</sup>水平,灌溉定额由

7 200~9 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>减少到4 200~5 400 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,节水约40%<sup>[10]</sup>。2000—2020年间全疆小麦、玉米、棉花每公顷平均分别增产17.05%、17.96%、39.35%,其中兵团分别增产44.40%、58.91%、41.71%,表明大田滴灌节水增产效果明显。具体见表1。

笔者所在团队连续9 a对比试验结果表明:在等灌溉量条件下,膜下滴灌能显著提高玉米产量和灌

溉水利用率, 9 a增产8.79%~24.10%, 平均增产14.35%;膜下滴灌灌溉水利用率提高14.3%。另外, 新疆小麦氮、磷、钾肥的平均利用率分别为41.4%、21.8%和45.2%;玉米氮、磷、钾肥的平均利用率分别为46.9%、20.5%和49.6%<sup>[11]</sup>, 均明显高于全国水平。另外, 滴灌种植, 减少了机耕作业环节和次数<sup>[3]</sup>, 减轻了劳动强度, 提高了劳动效率<sup>[12]</sup>, 大幅增加了农民收入。

表1 2000年与2020年新疆主要作物的单产水平

作物 Crops	自治区 Autonomous region		兵团 Corps		全疆 Total Xinjiang	
	2000	2020	2000	2020	2000	2020
	小麦 Wheat	4 836.77	5 486.19	4 915.54	7 098.17	4 848.22
玉米 Maize	7 797.62	8 833.36	7 543.37	11 987.24	7 779.80	9 177.11
棉花 Cotton	1 481.64	2 062.83	1 689.47	2 394.10	1 541.62	2 148.31

## 2 大田滴灌对农田土壤水分的影响

### 2.1 土壤水分的入渗和分布特征的变化

以前新疆大田作物主要采用的是大水漫灌的方式<sup>[8]</sup>, 单次灌溉量大, 短时间内土壤水分变为过饱和状态;滴灌属于局部、高频灌溉, 使作物始终处于较优的水分条件下, 避免了周期性水分过多或亏缺, 并能有效减少水分深层渗漏<sup>[13]</sup>。然而滴灌与漫灌条件下土壤的水分分布、入渗规律具有较大的差异<sup>[13-14]</sup>。灌溉模式改变导致农田土壤水分的入渗范围、含水量及其分布规律发生了明显变化。大田滴灌水分由滴头直接滴入作物根部附近的土壤, 属于多点源交汇入渗, 仅在滴灌带土壤周围形成一个椭球形或球形湿润体<sup>[15]</sup>, 湿润范围较小, 而宽行间保持相对干燥, 形成明显的“干湿”介面特征<sup>[16-17]</sup>, 这与传统灌溉的水分分布特征明显不同。

### 2.2 耕层土壤水分状况的变化

与传统灌溉相比, 滴灌耕层土壤总水量较低, 但根区有效含水量较高。生育期内土壤含水量在垂直方向上呈现出由地表向深层递增的趋势, 水平方向上呈现出由滴灌带向行间递增的趋势<sup>[18-19]</sup>。大田滴灌下0~60 cm土体的含水量明显与常规灌溉不同<sup>[20]</sup>, 生长季作物根区有效含水量高;而非生长季, 小流量滴灌的土壤水分入渗均匀, 入渗速度较慢, 但

水分主要集中在耕作层易蒸发;传统灌溉的水分入渗速度快、渗透不均匀、耕层易积水<sup>[21]</sup>。从全疆尺度分析, 大田滴灌土壤含水量在生育期内呈“先降低再增加最后降低”的趋势<sup>[22]</sup>;各年份之间亦存在明显的年际变化。笔者所在团队连续9 a监测膜下滴灌与传统灌溉不同位点的土壤水分状况, 监测结果表明<sup>[23]</sup>:膜下滴灌土壤水分含量呈现为窄行>根围>宽行, 而传统灌溉为宽行>根围>窄行;膜下滴灌窄行间土壤含水量显著高于传统灌溉, 生育期内含水量增幅达16.39%~40.85%;膜下滴灌根围土壤含水量增幅达5.97%~13.07%;而膜下滴灌宽行间土壤含水量低于传统灌溉, 降幅达2.55%~12.50%;整体上膜下滴灌较传统灌溉土壤平均含水量相对增加5.77%~12.26%。

## 3 大田滴灌对绿洲地下水埋深的影响

### 3.1 灌溉方式对绿洲地下水动态变化的影响

地下水动态变化是一个复杂的水文过程, 受到气候变化和人类活动的共同影响<sup>[24]</sup>;干旱地区地表水、灌溉及地下水开采是影响地下水埋深的主要因子<sup>[25]</sup>。新疆特殊的地形和自然条件, 造就了降水稀少、蒸发强烈的水循环过程, 影响着区域水量收支平衡和地下水埋深变化<sup>[26]</sup>。与以前的大水漫灌相比, 滴灌的每公顷平均灌溉量减少<sup>[9]</sup>, 单次灌溉量减少<sup>[9]</sup>, 在农田尺度上实现了节水, 减少了地下水开采量;但全疆农作物播种面积由2000年的33 887.6 km<sup>2</sup>增长至2020年的62 826.1 km<sup>2</sup>, 在绿洲尺度上增加了地下水开采面积和开采量。因此, 节水灌溉对绿洲地下水动态的影响主要有以下五方面:(1)大面积滴灌的应用造成地下水补给量减少而引起了地下水埋深变化<sup>[27]</sup>, 从而使流域水循环发生了变化。(2)现阶段新疆灌溉水源中地下水资源占比较大, 由于过量开采等因素影响, 区域水循环的规律及形成条件均发生了显著变化, 直接导致了地下水资源的分布变化。(3)南疆地区持续性的冬春灌溉也影响着地下水补给及其分布特征<sup>[28]</sup>。(4)节水灌溉以来新疆地下水天然补给量基本稳定, 但地表水体转化补给量持续减少, 尤其渠系渗漏和灌溉补给量大幅减少;(5)灌溉面积扩大, 导致农田灌溉耗水量增大, 也是影响地下水资源量的主要原因之一<sup>[29]</sup>。

### 3.2 绿洲农田地下水埋深的区域性变化

新疆地下水埋深与分布受水文、气象、地形地貌

和人为因素等影响;平原区地下水埋深经历了先减小后增大的过程。其中灌溉面积扩大、农田灌溉耗水量增大是地下水资源量变化的根本原因<sup>[30]</sup>。但新疆地域辽阔,各流域和区域间自然条件与经济发展水平差异较大,受自然条件、南北疆水资源开发利用及灌溉制度影响,各区域水循环过程和地下水埋深变化存在较大差异。梳理前人关于大田滴灌以来新疆地下潜水位动态变化的主要研究成果,发现南北疆的不同区域存在较大差异,具体如下:

1)玛纳斯河流域。1964—1987年,石河子地下水埋深每年下降0.35~0.52 m<sup>[31]</sup>;1987—2004年,石河子地下水埋深每年下降0.38~0.63 m<sup>[32]</sup>,其中1995年玛纳斯河流域潜水埋深1~3 m<sup>[33]</sup>;1998—2007年,148团和150团每年下降0.07~0.35 m<sup>[34]</sup>;1995—2015年,玛纳斯兰州湾镇每年平均下降0.74 m<sup>[35]</sup>;1997—2006年,147团变化较小,148团每年平均下降0.13 m,150团每年平均下降0.53 m<sup>[29,35]</sup>;2007—2014年147团每年平均下降1.46 m,148团每年平均下降1.58 m<sup>[35]</sup>;2008—2018年沙湾县每年下降0.55~2.84 m<sup>[36]</sup>;2015—2018年147团每年平均上升0.35 m,148团变化较小<sup>[35]</sup>;2016—2020年石河子市地下水埋深快速上升(-3~-2 m);玛纳斯县南部快速上升(-4~-3 m),而北部快速下降(>5 m);呼图壁县快速下降(>5 m);昌吉市以缓慢下降为主(变幅2~3 m)<sup>[37]</sup>。归纳其变化趋势如下:玛纳斯流域地下水埋深在1964—1987年下降;1987—2007年整体下降,部分地区有微小上升;2008—2016年整体下降,部分地区上升;2016—2020年不同市县之间有升有降。

2)阿克苏-阿拉尔灌溉区。1953—1962年农区由开垦前的4~6 m上升到1~3 m<sup>[38]</sup>,20世纪50—60年代,非农区地下水埋深为3~6 m<sup>[39]</sup>;1962—1980年,农区地下水埋深上升至1~2 m后,基本停止上升<sup>[38]</sup>;但非农区1973年仍保持在6~7 m<sup>[39]</sup>;1980年后由于排水系统的完善,农区地下水埋深降至2.0 m以下<sup>[36]</sup>,但非农区1989年已下降到8.0~10.4 m;2001—2014年,农区地下水埋深整体下降,降幅约0.94 m<sup>[40]</sup>;但2009—2017年下游非农区地下水埋深升高约3.75 m<sup>[41]</sup>。概括起来:1953—1962年快速上升;1962—1980年处于平衡阶段,农区地下水埋深稳定在1~2 m,但非农区快速下降;1980—2010年农区略有下降,非农区逐步回升;2011年至今,农区缓慢下降,非农区稳定回升。

3)喀什地区。不同灌区存在一定差异,其中喀什葛尔灌区1980—1989年地下水埋深为4 m左右,1990—1993年为7 m左右,1998年为11 m左右,2012年为15 m左右<sup>[42]</sup>;喀什地区1990—2018年东部由5.7 m下降至5.3 m左右,西部由9.1 m增加至9.7 m左右,南部保持在6.5 m左右,北部由4.8 m增加至4.9 m左右<sup>[43]</sup>;叶尔羌河流域1993—2011年总体呈增加趋势,每年约0.18 m,2005年前保持稳定,2005年后,开始持续增加<sup>[44]</sup>,2006—2010年每年下降约0.165 m,2011—2012年地下水埋深略有回升,2013—2017年每年下降约0.3 m<sup>[45]</sup>。整体上,1990—2018年,喀什噶尔河流域中下游呈现出先降低后升高的趋势,上游先上升后下降再上升最后下降,整体上喀什噶尔河流域水埋深呈降低趋势;叶尔羌河流域2010年前水埋深缓慢降低,2011—2012年水埋深略有回升,2013—2018年又快速降低。

4)奎屯河流域。1994—2003年乌苏市地下水埋深呈波动下降,每年下降0.25~0.38 m<sup>[46-47]</sup>;2003—2010年每年下降1.03~2.57 m<sup>[46-47]</sup>;2012—2015年,下降幅度急剧增加,每年平均降幅达到2.16 m<sup>[46]</sup>;2015—2017年,有所回升,每年上升约1.37 m<sup>[46]</sup>。

5)其他区域。由于均为单一文献且数据不完整、不连续,地下水位埋深整体上有升有降,未能连续统计,如克拉玛依农业综合开发区1997—2013年呈持续上升趋势,共上升约6.85 m<sup>[48]</sup>;巴州灌溉试验站,地下水埋深从2012年开始滴灌前的2.5 m上升到2013年的3.0 m左右,2015—2016年高达5.0~6.0 m<sup>[49]</sup>;阜康市1988—2003年地下水埋深呈逐年下降趋势,每年平均下降0.418 m<sup>[50]</sup>;吐鲁番地区1988—2016年地下水埋深降幅约5.5 m<sup>[51]</sup>。

笔者所在研究项目团队于2022年6—7月间分别对玛纳斯河流域、阿克苏-阿拉尔灌溉区、喀什地区进行了土壤和地下水采样,结果表明:(1)玛纳斯河流域。除水库周边,其他区域地下水位均超过5 m。(2)阿克苏-阿拉尔灌溉区。除部分点地下水位超过5 m,大部分地区在1.5~2.5 m,仅极少部分不足1 m。(3)喀什地区。除特殊区域外,多数区域在2.5 m以上,甚至少部分地区超过5 m。

综上,从节水灌溉角度来看,长周期的节水灌溉会影响北疆地下水埋深;但南疆地下潜水受到冬春灌溉和水库渗漏等因素补给,节水灌溉对地下水埋深影响不明显。

## 4 大田滴灌对新疆农田盐分状况的影响

### 4.1 新疆农田水盐运移过程的变化

新疆“三山夹二盆”的地形与特殊气候格局,造成岩相地貌带中的盐分在平原区汇集,使得土壤受到不同程度盐分的影响。土壤盐分的时空分布变化与水循环过程和水资源分配直接相关<sup>[51]</sup>。农田土壤水盐运移的过程与环境 and 人为因素紧密相关<sup>[52]</sup>,其中农田灌溉直接改变了土壤水盐的入渗过程和地下水动态。自从大田滴灌以来,农田土壤水盐运移和分布发生了一系列变化。传统的大水漫灌条件下,地下水埋深较浅,在强烈蒸发下,地下水中的盐分通过潜水蒸发在土壤表层累积,易引发盐碱化<sup>[48]</sup>。节水灌溉以来,随地下水埋深的增大,土壤表层积盐速率减小<sup>[53]</sup>;当地下水埋深稳定维持在临界深度以下,土壤返盐问题也将得到有效遏制<sup>[54]</sup>。在农田尺度上,特定的灌水方式下作物根系被限制在土壤湿润体内部,并形成相对的淡盐区<sup>[23,55]</sup>;但有限水量不能满足土壤洗盐需求导致盐分在湿润区边缘聚集<sup>[17,23,48]</sup>,当滴灌期结束时容易形成滴灌带下脱盐,膜间积盐的现象<sup>[56]</sup>;长期覆膜滴灌会导致盐分在耕层积累<sup>[56]</sup>。另外,覆膜种植也阻断了土壤水分与大气之间的直接联系,改变了蒸发问题的边界条件,起到了抑制土面蒸发的作用,明显减缓了表土返盐的过程。

### 4.2 新疆农田耕层盐分的迁移与分布

大田滴灌是一种少量多次的非饱和灌溉,湿润峰下移的距离较短,土壤盐分不能彻底排出土体。因此,随着膜下滴灌应用年限的增加,累积在田间土壤湿润锋处的盐分究竟如何变化? 土壤盐分迁移过程与分布带来哪些影响? 是否在作物根区积累? 针对这些问题很多学者开展了一系列研究。

王振华团队<sup>[57-65]</sup>在石河子地区121团分别对滴灌0~6、8、10、13、15、17、19、23 a的土壤监测结果表明,随着滴灌年限的增加,盐分由表层聚集转变为深层累积,根区土壤盐分含量随滴灌年限延长呈降低趋势;随着滴灌年限增加,土壤盐分聚集区逐渐下移,滴灌2 a在60~100 cm形成积盐区;5 a以上,积盐区在20~140 cm内消失,但主要集中在0~20 cm土层及140 cm以下;滴灌6 a内为迅速脱盐阶段,6~8 a为平稳脱盐阶段,8 a以上为盐分稳定阶段;随滴灌年限延长,阳离子以及 $\text{Cl}^-$ 呈负指数幂函数曲线降

低,钠吸附比和 $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 降低,盐碱土类型可能由氯化物-硫酸盐盐土转化为硫酸盐盐土。虎胆·吐马尔白团队<sup>[66-70]</sup>在石河子地区121团分别对滴灌1、4、6、8、10、12、15、16 a的土壤监测结果也表明,滴灌土壤盐分含量随着作物种植年限先减少后增加;滴灌前6 a表层土壤盐分受滴灌淋洗作用不断减小,土壤呈脱盐趋势;6 a后积盐区土壤盐分随着年限的增加不断向上扩大;经过8 a滴灌,121团6连的0~100 cm土层平均脱盐率达84.89%;滴灌4~16 a内60 cm以上土层基本处于脱盐状态,60~150 cm范围内存在稳定积盐层。王雅琴等<sup>[71-72]</sup>在石河子地区121团对滴灌0~7 a的土壤监测结果表明,滴灌可有效降低盐荒地耕作层土壤的含盐量;随着滴灌年限增长,0~30 cm土壤盐分均有所下降,30~60、60~100 cm黏土和壤土的盐分整体下降但部分年份增加,但第7年总体呈下降趋势。龚江等<sup>[73-74]</sup>在147团的土壤监测中发现,滴灌4 a内土壤盐分会被淋洗,但年限越长,淋洗作用越弱;滴灌1 a的土壤盐分呈直线下降,尤其0~40 cm土壤的脱盐效果较明显;而滴灌5、10 a土壤盐分呈波动变化,下降不明显。孟超然等<sup>[75]</sup>对147团滴灌0~15 a的耕地调查发现,滴灌3 a全团耕层土壤盐分含量从3.13 g/kg降低至3.00 g/kg,但滴灌12 a后升高至4.81 g/kg。郑琦等<sup>[76]</sup>对石河子市周边滴灌1、3、5、8、10 a的耕地调查发现,随着海拔高度的降低,土壤盐分含量呈现先降低后升高再降低的趋势,高盐分区主要集中在海拔350~400 m;地下水埋深对土壤盐分含量变化影响明显,随着地下水埋深的变浅,土壤盐分显著增加;随着滴灌年限增加,0~100 cm土层盐分呈现降低趋势。罗毅<sup>[77]</sup>对玛纳斯流域滴灌1~12 a的土壤调查发现,原始荒地0~200 cm土层平均含盐量17.23 g/kg,漫灌后平均含盐量0.59 g/kg,不同滴灌时间的土壤含盐量平均值为6.38 g/kg,且仍处于脱盐过程中;原耕地上长期滴灌,土壤呈积盐趋势,土层含盐量每年平均增长0.22 g/kg。胡宏昌等<sup>[78]</sup>和范未华等<sup>[79]</sup>对库尔勒地区滴灌0~6、10、14、16 a的土壤监测发现,滴灌50 cm土层盐分升高约25%,漫灌盐分降低明显;滴灌盐分入渗约50 cm,漫灌150 cm;滴灌3 a内,生育期内土壤含盐量呈先增再降后增的趋势,盐分在30~50 cm聚积;滴灌种植10 a以后,表层土壤总盐量降低,总盐量从2003年的18.08 g/kg降至2018年的7.35 g/kg;滴灌种植10 a内年均脱盐速率为4.75 g/kg,14、16 a的年均脱盐速率分别为0.59、0.47 g/kg。

综合分析上述研究,发现:(1)长期滴灌对新疆土壤盐分影响的研究主要集中在玛纳斯河流域,其他区域研究相对较少,但南北疆滴灌对土壤盐分的影响存在明显差异;(2)随着滴灌年限增加,土壤盐分呈现出先减少后增加的趋势,一般认为6~8 a是时间节点;(3)大田滴灌盐分分布由表层聚集转变为向深层累积,长期滴灌后盐分主要集中在0~20 cm和100 cm以下;(4)灌溉水量、土壤质地、地下水埋深是长期滴灌对土壤盐分分布影响的主要因素。

笔者所在团队前期研究结果也表明:滴灌2 a的玉米土壤盐分含量大于滴灌6 a以上的;膜下滴灌能够在植物根系附近形成淡盐区,可将多余的盐分累积在膜间,但传统灌溉均无此现象。此外,兵团盐渍化耕地面积为6 670.87 km<sup>2</sup>,占兵团耕地总面积42.41%,而南疆4个师的盐渍化耕地面积为2 716.47 km<sup>2</sup>,占南疆师耕地总面积67.79%。从节水灌溉的角度来看,在一定年限内滴灌有利于北疆耕层土壤脱盐,但南疆地区受地下水埋深和返盐的影响,土壤盐渍化的问题仍较突出。

## 5 问题与对策

近30年来,大田滴灌在新疆地区得到了快速发展,但由于新疆地域辽阔,地形、气候、种植、土壤等自然条件差别很大,长期大田滴灌引发了盐分在耕层累积,区域性地下水动态差异制约着区域生态和土壤安全,而土壤理化性质受长期滴灌影响正在向不可逆转的方向发展,尤其南疆水盐不平衡问题加剧了耕地盐碱化。这些与大田滴灌相关的生态环境问题值得重点关注。综合考虑土壤、灌溉水源、地下水位等因素,我们提出以下4点建议。

### 5.1 “两水”统观统用,构建安全地下水埋深线

长期节水灌溉对南北疆的地下潜水埋深的影响截然不同,部分区域已接近或超过安全生态警戒地下水埋深线,但部分区域仍在盐渍化临界地下水埋深线以上。因此,从地下水生态水位安全角度入手,系统开展流域地下水埋深动态及化学成分研究和评价,确定临界地下水埋深和安全生态警戒埋深,统筹好利用好地表水和地下水2种资源,统筹好流域内的冰川、河流、水库、渠系和地下水等各种水资源,合理利用微咸水和再生水等非常规水资源,实现区域用水和补水协同,建立区域灌排一体化体系,构建区域地下水安全埋深线,保障区域用水和生态双安全。

### 5.2 灌溉洗盐结合,保障良好农田耕层盐分

随着滴灌年限增加,耕层土壤脱盐和积盐问题日益严重。一方面,地下水埋深的下降减少了潜水蒸发带来的盐分;另一方面,有灌无排(或少排)导致农事活动带入和含盐母质分解的盐分在土壤表层累积。如何在水资源短缺的情况下实现节水灌溉和防治农田次生盐碱化的协同,是绿洲农业可持续发展亟需解决的问题。因此,结合区域地下水安全水位线,因地制宜发展作物生长期调水控盐、非生长期调水排盐等水盐调控技术;以灌排工程改造为先导,综合运用暗管(竖井)排盐、滴灌调盐、化学改良、生物聚盐、农艺改土等措施,实现耕层土体的降盐提质,保障绿洲农业可持续发展。

### 5.3 区域统防统治,实现水土资源可持续利用

“治理盐碱,水是关键”。以水为载体,以灌区为主体,区域协同,兵地统筹,水盐共治共管,建立适合区域作物和土壤改良的灌溉制度,统一规划治理区域的排水体系,综合应用“干播湿出”“管道输水”“暗管排盐”等技术系统管理区域水盐。结合水资源和土壤调查评价的相关成果,根据农田等级划分和盐碱地分类评估的结果,建立不同改土控盐目标,探索盐碱化土壤资源高效综合管理技术和农田抑盐避盐耕作新技术,建立区域盐碱化农田作物高产高效关键技术体系与综合治理模式,建立区域水资源-盐碱地-作物-生态和谐发展的调控体系,实现区域水土资源可持续利用。

### 5.4 节水降盐为核心,提升区域农业资源利用率

新疆耕地后备资源丰富,是我国农地资源开发的接替区,但水资源短缺和土壤盐碱化问题制约着区域农业的发展。从绿洲农业资源高效利用角度来讲,以灌区内部节水挖潜为抓手,摸清水肥盐运移规律,优化灌溉制度,实现传统灌溉农业向集约型现代灌溉农业转型;实施综合高效节水工程,加大田间灌排工程改造力度,提升水资源利用效率;因地制宜,以水定策,分区分类开展盐碱地综合治理,科学利用盐碱地资源;发展低碳农业,实现耕地质量提升与土壤固碳的双赢。

## 6 结语

土壤盐碱化和水资源短缺是影响干旱、半干旱地区农业可持续发展的重要因素,同时灌区土壤盐碱化的严重程度与水资源开发利用的方式和程度密切相关。大田滴灌大规模的推广和应用,极大推动了新

疆绿洲农业的发展;然而在不同区域应用大田滴灌技术时,对土壤水盐平衡及地下水动态的影响有明显差异。2023年“中央一号”文件明确指出,“统筹推进高效节水灌溉”“加强高标准农田建设”做好盐碱地等耕地后备资源综合开发利用试点”。因此,节水降盐是未来新疆农业发展的主要方向,但如何高效利用区域水土资源、实现区域水盐平衡这个科学问题值得长久关注。

## 参考文献 References

- [1] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. Statistics Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).
- [2] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆生产建设兵团统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022. Statistics Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps. Statistical yearbook of Xinjiang Production and Construction Corps 2010 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).
- [3] 尹飞虎. 兵团节水农业发展思考及建议[J]. 兵团建设, 2012(15): 32-33. YIN F H. Thoughts and suggestions on the development of water-saving agriculture in Bingtuan [J]. Corps construction, 2012(15): 32-33 (in Chinese).
- [4] 曹振玺, 李勇, 申孝军, 等. 不同灌水技术参数对农田水盐运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 57-62, 71. CAO Z X, LI Y, SHEN X J, et al. Effects of drip irrigation schedule on water and salt movement in soil [J]. Journal of irrigation and drainage, 2020, 39(3): 57-62, 71 (in Chinese with English abstract).
- [5] 叶岱夫. 滴灌对环境污染的防治作用[J]. 农业环境科学学报, 1987, 6(5): 39-40. YE D F. Prevention and control effect of drip irrigation on environmental pollution [J]. Journal of agro-environmental science, 1987, 6(5): 39-40 (in Chinese).
- [6] 李雅琴, 李发东, 张秋英, 等. 玛纳斯河流域土壤水稳定同位素特征及运移机制[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 690-697. LI Y Q, LI F D, ZHANG Q Y, et al. Stable isotopic characteristics and soil moisture migration mechanisms in the Manas River Basin [J]. Journal of agricultural resources and environment, 2022, 39(4): 690-697 (in Chinese with English abstract).
- [7] 顾烈烽. 新疆生产建设兵团棉花膜下滴灌技术的形成与发展[J]. 节水灌溉, 2003(1): 27-29. GU L F. Formation and development of drip irrigation technology under plastic film for cotton in Xinjiang production and construction corps [J]. Water saving irrigation, 2003(1): 27-29 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨金麒. 新疆天业机械化大田膜下滴灌技术及应用[J]. 新疆农垦经济, 2001(3): 42-43. YANG J Q. Technology and application of drip irrigation under plastic film in Xinjiang Tianye mechanized field [J]. Xinjiang agricultural reclamation economy, 2001(3): 42-43 (in Chinese with English abstract).
- [9] 尹飞虎. 节水农业及滴灌水肥一体化技术的发展现状及应用前景[J]. 中国农垦, 2018(6): 30-32. YIN F H. Development status and application prospect of water-saving agriculture and drip irrigation water-fertilizer integration technology [J]. China state farm, 2018(6): 30-32 (in Chinese).
- [10] 王冀川, 高山, 徐雅丽, 等. 新疆小麦滴灌技术的应用与存在问题[J]. 节水灌溉, 2011(9): 25-29. WANG J C, GAO S, XU Y L, et al. Application and existing problems of drip irrigation for wheat in Xinjiang [J]. Water saving irrigation, 2011(9): 25-29 (in Chinese with English abstract).
- [11] 梁飞, 曾胜和, 陈云, 等. 关于粮食作物滴灌施肥高产高效机理的思考[J]. 节水灌溉, 2015(9): 87-90. LIANG F, ZENG S H, CHEN Y, et al. Discussion on mechanism of high yield and high efficiency of fertigation for food crops [J]. Water saving irrigation, 2015(9): 87-90 (in Chinese with English abstract).
- [12] 汤明尧, 沈重阳, 陈署晃, 等. 新疆小麦、玉米的产量和氮磷钾肥利用效率[J]. 中国农业科学, 2022, 55(14): 2762-2774. TANG M Y, SHEN C Y, CHEN S H, et al. Yield of wheat and maize and utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium in Xinjiang [J]. Scientia agricultura sinica, 2022, 55(14): 2762-2774 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王振华, 陈学庚, 郑旭荣, 等. 关于我国大田滴灌未来发展的思考[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 1-9, 38. WANG Z H, CHEN X G, ZHENG X R, et al. Discussion of the future development of field drip irrigation in China [J]. Agricultural research in the arid areas, 2020, 38(4): 1-9, 38 (in Chinese with English abstract).
- [14] 胡笑涛, 康绍忠, 马孝义. 地下滴灌灌水均匀度研究现状及展望[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 113-117. HU X T, KANG S Z, MA X Y. The statue quo and prospect of uniformity under subsurface drip irrigation [J]. Agricultural reseach in the arid areas, 2000, 18(2): 113-117 (in Chinese with English abstract).
- [15] DANIERHAN S, SHALAMU A, TUMAERBAI H, et al. Effects of emitter discharge rates on soil salinity distribution and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under drip irrigation with plastic mulch in an arid region of Northwest China [J]. Journal of arid land, 2013, 5(1): 51-59.
- [16] 李明思, 谢云, 崔伟敏. 线源滴灌土壤湿润均匀性的影响因素试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6): 11-14, 33. LI M S, XIE Y, CUI W M. Experimental study on factors influencing soil moisture uniformity under linear source drip irrigation [J]. Journal of irrigation and drainage, 2007, 26(6): 11-14, 33 (in Chinese with English abstract).
- [17] 胡晓棠, 李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 121-123. HU X T, LI M S. Effect of trickle irrigation under sub-film on the soil conditions of rhizosphere in cotton [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2003, 11(3): 121-123 (in Chinese with English abstract).
- [18] 周和平, 徐小波, 兰玉军. 膜下滴灌条件下土壤水盐运移研究综述[J]. 节水灌溉, 2006(4): 8-10, 13. ZHOU H P, XU X B, LAN Y J. Review of research on soil water and salt transportation under the condition of drip irrigation under film in Xinjiang area [J]. Water saving irrigation, 2006(4): 8-10, 13 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陈霖明, 李艳红, 李发东, 等. 玛纳斯河流域出苗期棉田土壤膜下滴灌前后水分-盐分-养分运移分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(5): 110-119. CHEN L M, LI Y H, LI F D, et al. Analysis of water-salt-nutrient transport before and after drip irrigation

- under plastic film in soil of cotton field at seedling stage in Manas River Basin[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(5):110-119 (in Chinese with English abstract).
- [20] 朱友娟,郑德明,姜益娟.新疆棉田膜下滴灌方式下土壤水分运移变化规律研究[J].新疆农业科学,2007,44(5):613-618. ZHU Y J, ZHENG D M, JIANG Y J. Study on the rule of transporting and moving of soil moisture under film drip irrigation of Xinjiang cotton field[J]. Xinjiang agricultural sciences, 2007, 44(5):613-618 (in Chinese with English abstract).
- [21] 王萌萌,吕廷波,何新林,等.滴灌种植模式下土壤水热盐及棉花生长研究[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):176-186. WANG M M, LÜ T B, HE X L, et al. Effects of drip-irrigated planting modes on soil water, temperature, salt and cotton growth[J]. Agricultural research in the arid areas, 2018, 36(5):176-186 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈小芹,王振华,何新林,等.北疆棉田不同冬灌方式对土壤水分、盐分和温度分布的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):132-137. CHEN X Q, WANG Z H, HE X L, et al. Effects of winter irrigation method on soil moisture, salt and temperature distribution in cotton fields of Northern Xinjiang[J]. Journal of soil and water conservation, 2014, 28(2):132-137 (in Chinese with English abstract).
- [23] 于晓瑞,虎胆·吐马尔白,杨鹏年,等.长期膜下滴灌棉田土壤水盐分布变化及其对棉花生长影响[J].节水灌溉,2016(2):63-66,69. YU X R, HUDAN T, YANG P N, et al. A study on the changes of distribution of soil moisture and salinity and its impact on the growth of cotton in long-term drip irrigation cotton field[J]. Water saving irrigation, 2016(2):63-66,69 (in Chinese with English abstract).
- [24] LIU M J, WANG G D, LIANG F, et al. Optimal irrigation levels can improve maize growth, yield, and water use efficiency under drip irrigation in northwest China[J/OL]. Water, 2022, 14(23):3822[2022-09-30]. <https://doi.org/10.3390/w14233822>.
- [25] 张彦,程锐,邹磊,等.气候变化和人类活动对灌区地下水埋深的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(2):91-100. ZHANG Y, CHENG R, ZOU L, et al. The effects of climate change and anthropogenic activities on groundwater in irrigation district[J]. Journal of irrigation and drainage, 2022, 41(2):91-100 (in Chinese with English abstract).
- [26] 翟家齐,刘宽,赵勇,等.干旱区绿洲地下水位调控方法与模型研究进展[J].水文,2021,41(2):1-7. ZHAI J Q, LIU K, ZHAO Y, et al. Advances in regulation method and model of ecological groundwater level in arid oasis regions[J]. Journal of China hydrology, 2021, 41(2):1-7 (in Chinese with English abstract).
- [27] 钱剑平,赵建平,桂东伟,等.策勒绿洲生态与灌溉用水对地下水埋深的影响[J].水土保持通报,2018,38(1):96-102. QIAN J P, ZHAO J P, GUI D W, et al. Effects of ecological water use and irrigation on groundwater depth in Cele oasis[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2018, 38(1):96-102 (in Chinese with English abstract).
- [28] 吉磊,刘兵,何新林,等.玛纳斯河下游灌区地下水埋深变化特征及成因分析[J].灌溉排水学报,2015,34(9):59-65. JI L, LIU B, HE X L, et al. Changing characteristics and influencing causes of groundwater depth in irrigation areas in the lower reaches of the manas river[J]. Journal of irrigation and drainage, 2015, 34(9):59-65 (in Chinese with English abstract).
- [29] 周宏飞,马金玲.塔里木灌区棉田的水盐动态和水盐平衡问题探讨[J].灌溉排水学报,2005,24(6):10-14. ZHOU H F, MA J L. Studies on water-salt dynamics and balance of cotton crops land in Tarim irrigation region[J]. Journal of irrigation and drainage, 2005, 24(6):10-14 (in Chinese with English abstract).
- [30] 吴彬,杜明亮,穆振侠,等.1956—2016年新疆平原区地下水资源量变化及其影响因素分析[J].水科学进展,2021,32(5):659-669. WU B, DU M L, MU Z X, et al. Analysis on the variation of groundwater resources and influencing factors in Xinjiang plain area from 1956 to 2016[J]. Advances in water science, 2021, 32(5):659-669 (in Chinese with English abstract).
- [31] 徐春燕.石河子垦区浅层地下水及土壤水动态研究[D].西安:长安大学,2013. XU C Y. Dynamic research on shallow groundwater and soil moisture of Shihezi agricultural areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [32] 管春兴,张虹波,王战,等.玛纳斯河流域山前平原区地下水资源动态变化分析[J].水利水电技术,2019,50(3):1-9. GUAN C X, ZHANG H B, WANG Z, et al. Dynamic change analysis on groundwater resources in piedmont plain of Manas River Basin[J]. Water resources and hydropower engineering, 2019, 50(3):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [33] 陈伏龙,郑旭荣,何新林,等.莫索湾灌区1998—2007年地下水埋深变化及影响因素[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(3):317-320. CHEN F L, ZHENG X R, HE X L, et al. Change of groundwater depth and impact factors in Mosuowan irrigation district during 1998—2007[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2011, 44(3):317-320 (in Chinese with English abstract).
- [34] 陈彬鑫,何新林,杨丽莉,等.莫索湾灌区近22年来地下水埋深变化及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):155-160. CHEN B X, HE X L, YANG L L, et al. Analysis of groundwater depth change and the influencing factors in Mosuowan irrigated area in recent 22 years[J]. Journal of arid land resources and environment, 2020, 34(12):155-160 (in Chinese with English abstract).
- [35] 阙建,杨鹏年,刘婕,等.干旱灌区规模扩张下的地下水位演化特征[J].新疆环境保护,2019,41(1):15-21. KAN J, YANG P N, LIU J, et al. Evolution characteristics of groundwater level under scale expansion of arid irrigated areas[J]. Environmental protection of Xinjiang, 2019, 41(1):15-21 (in Chinese with English abstract).
- [36] 丁启振,周金龙,杜明亮,等.新疆石河子-昌吉地区2016—2020年地下水动态特征分析[J].灌溉排水学报,2022,41(2):109-117. DING Q Z, ZHOU J L, DU M L, et al. Spatiotemporal variation of groundwater table from 2016 to 2020 in Shihezi-Changji of Xinjiang[J]. Journal of irrigation and drainage, 2022, 41(2):109-117 (in Chinese with English abstract).
- [37] 朱连勇.阿拉尔垦区水资源变化特征及合理配置研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2017. ZHU L Y. Study on the variation characteristics of water resources and reasonable allocation of Alar irrigation area[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [38] 陈亚宁,李卫红,张元明,等.新疆塔里木河水资源开发利用与生

- 态保育对策[J].资源科学,2004,26(S1):74-80.CHEN Y N,LI W H,ZHANG Y M,et al.Water resource utilization and ecological protection of the Tarim River in Xinjiang[J].Resources science,2004,26(S1):74-80 (in Chinese with English abstract).
- [39] 赵飞.阿克苏河流域地下水资源量年际、年内变化特征分析[J].陕西水利,2021(5):91-93.ZHAO F.Analysis of interannual and intraannual variation characteristics of groundwater resources in Aksu River Basin[J].Shaanxi water resources,2021(5):91-93 (in Chinese with English abstract).
- [40] 雍正,赵成义,施枫芝,等.近20年塔里木河干流区地下水埋深变化特征及其生态效应研究[J].水土保持学报,2020,34(3):182-189.YONG Z,ZHAO C Y,SHI F Z,et al.Variation characteristics of groundwater depth and its ecological effect in the main stream of Tarim River in recent 20 years[J].Journal of soil and water conservation,2020,34(3):182-189 (in Chinese with English abstract).
- [41] 王博.喀什噶尔河流域平原区地下水系统特征和生态环境演化分析[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.WANG B.Study on characteristics of groundwater system and evolution of eco-environment in the plain area of Kashgar River Basin[D].Urumqi:Xinjiang Agricultural University,2021 (in Chinese with English abstract).
- [42] 阿尼克孜·麦麦提.喀什地区1990—2018年地下水埋深变化特征分析[J].陕西水利,2020(5):55-56,59.MAMETI A.Analysis on the change characteristics of groundwater depth in Kashgar from 1990 to 2018[J].Shaanxi water resources,2020(5):55-56,59 (in Chinese with English abstract).
- [43] 陈钟望,杨汉波,陈东,叶尔羌河绿洲近20年来地下水埋深变化及其原因分析[J].水力发电学报,2016,35(6):58-66.CHEN Z W,YANG H B,CHEN D.Analysis of groundwater table depth changes in Yarkant plain oasis in recent 20 years and their causes[J].Journal of hydroelectric engineering,2016,35(6):58-66 (in Chinese with English abstract).
- [44] 白宜斐,王弋,陈亚宁,等.叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(6):242-249.BAI Y F,WANG Y,CHEN Y N,et al.Variation of groundwater depth and its influencing factors in the irrigated area of the Yarkant River Basin[J].Journal of water resources and water engineering,2019,30(6):242-249(in Chinese with English abstract).
- [45] 高宇阳,杨鹏年,阚建,等.人类活动影响下乌苏市地下水埋深演化趋势[J].灌溉排水学报,2019,38(10):90-96.GAO Y Y,YANG P N,KAN J,et al.The evolution trend of groundwater level in Wusu City under the influence of human activities[J].Journal of irrigation and drainage,2019,38(10):90-96 (in Chinese with English abstract).
- [46] 刘明东.新疆乌苏市地下水资源现状评价[J].西部探矿工程,2013,25(8):118-119,124.LIU M D.Evaluation of groundwater resources in Wusu City,Xinjiang[J].West-China exploration engineering,2013,25(8):118-119,124 (in Chinese with English abstract).
- [47] 龙新刚,严少华.乌苏地下水资源现状评价[J].北方环境,2011,23(4):80.LONG X G,YAN S H.Evaluation of groundwater resources in Wusu[J].Northern environment,2011,23(4):80 (in Chinese with English abstract).
- [48] 穆振侠,任贤月,俞雪琴,等.特定条件下农业灌溉用水对地下水水量与水质的影响研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):112-117.MU Z X,REN X Y,YU X Q,et al.Effects of agricultural irrigation on groundwater quantity and quality under specific conditions[J].Journal of arid land resources and environment,2019,33(3):112-117 (in Chinese with English abstract).
- [49] 明广辉,田富强,胡宏昌.地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J].农业工程学报,2018,34(5):90-97.MING G H,TIAN F Q,HU H C.Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J].Transactions of the CSAE,2018,34(5):90-97 (in Chinese with English abstract).
- [50] 向伟玲,阜康市地下水时空动态变化及生态影响研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2007.XIANG W L.Temporal and spatial dynamic variation of groundwater and ecological impact research of Fukang[D].Urumqi:Xinjiang University,2007 (in Chinese with English abstract).
- [51] 商佐,唐蕴,杨姗姗.近30年吐鲁番盆地地下水动态特征及影响因素分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(3):192-203.SHANG Z,TANG Y,YANG S S.Analysis of groundwater dynamic characteristics and influencing factors in Turpan Basin in recent 30 years[J].Journal of China institute of water resources and hydropower research,2020,18(3):192-203 (in Chinese with English abstract).
- [52] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012,35(1):1-9.CHEN Y N,YANG Q,LUO Y,et al.Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J].Arid land geography,2012,35(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [53] 徐力刚,杨劲松,徐南军,等.农田土壤中水盐运移理论与模型的研究进展[J].干旱区研究,2004,21(3):254-258.XU L G,YANG J S,XU N J,et al.Progress of the study on theories and models of water-salt transport in cultivated soil[J].Arid zone research,2004,21(3):254-258 (in Chinese with English abstract).
- [54] 陈永宝,胡顺军,罗毅,等.新疆喀什地下水浅埋区弃荒地表层土壤积盐与地下水的关系[J].土壤学报,2014,51(1):75-81.CHEN Y B,HU S J,LUO Y,et al.Relationship between salt accumulation in topsoil of deserted land and groundwater in areas with shallow groundwater table in Kashi,Xinjiang[J].Acta pedologica sinica,2014,51(1):75-81 (in Chinese with English abstract).
- [55] 罗家雄.新疆垦区的地下水临界深度[J].新疆农业科学,1985,22(1):19-22.LUO J X.Critical depth of groundwater in Xinjiang reclamation area[J].Xinjiang agricultural sciences,1985,22(1):19-22 (in Chinese).
- [56] DONG H,KONG X Q,LUO Z,et al.Unequal salt distribution in the root zone increases growth and yield of cotton[J].European journal of agronomy,2010,33(4):285-292.
- [57] WANG Z,FAN B,GUO L.Soil salinization after long-term mulched drip irrigation poses a potential risk to agricultural sustainability[J].European journal of soil science,2019,70(1):20-24.
- [58] 谭明东,王振华,王越,等.长期滴灌棉田非灌溉季节土壤盐分累积特征[J].干旱区研究,2022,39(2):485-492.TAN M D,WANG Z H,WANG Y,et al.Soil salt accumulation characteristics of long-term drip irrigation in cotton fields during non-irrigation seasons[J].Arid zone research,2022,39(2):485-492 (in

- Chinese with English abstract).
- [59] 李文昊,王振华,郑旭荣,等.长期膜下滴灌对根区土壤盐分及棉花生长影响研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(8):161-166.LI W H, WANG Z H, ZHENG X R, et al. The effect of drip irrigation under film in long-term on the soil salinity in root zone and the cotton growth[J]. Journal of arid land resources and environment, 2015, 29(8): 161-166 (in Chinese with English abstract).
- [60] 李文昊,王振华,郑旭荣,等.长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征[J].农业工程学报,2016,32(10):67-74.LI W H, WANG Z H, ZHENG X R, et al. Soil salinity variation characteristics of cotton field under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 67-74 (in Chinese with English abstract).
- [61] 李朝阳,王振华,郑旭荣,等.膜下滴灌应用年限对盐碱荒地土壤盐分的调控[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(6):696-701.LI Z Y, WANG Z H, ZHENG X R, et al. Different years of drip irrigation under film application in saline and uncultivated land to control soil salt[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2013, 46(6): 696-701 (in Chinese with English abstract).
- [62] 李明思,刘洪光,郑旭荣.长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J].农业工程学报,2012,28(22):82-87.LI M S, LIU H G, ZHENG X R. Spatiotemporal variation for soil salinity of field land under long-term mulched drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 82-87 (in Chinese with English abstract).
- [63] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等.典型绿洲灌区长期膜下滴灌棉田根区土壤盐分及离子变化特征[J].水土保持学报,2014,28(3):158-165.WANG Z H, YANG P L, ZHENG X R, et al. Variation characteristics of soil salinity and ion in root zone by long-term drip irrigation under mulch in typical oasis irrigation area[J]. Journal of soil and water conservation, 2014, 28(3): 158-165 (in Chinese with English abstract).
- [64] 李朝阳,郑旭荣,王振华,等.滴灌年限对土壤盐分分布及棉花的影响[J].节水灌溉,2012(8):39-42.LI Z Y, ZHENG X R, WANG Z H, et al. Influence of drip irrigation years on soil salinity distribution and cotton[J]. Water saving irrigation, 2012(8): 39-42 (in Chinese with English abstract).
- [65] 王振华,郑旭荣,李朝阳.不同滴灌年限土壤盐分分布及对棉花的影响初步研究[J].中国农村水利水电,2011(6):63-66,69.WANG Z H, ZHENG X R, LI Z Y. Initial research on the distribution of the soil salinity with different drip irrigation years and its influence on cotton[J]. China rural water and hydropower, 2011(6): 63-66, 69 (in Chinese with English abstract).
- [66] 朱珠,虎胆·吐马尔白,朱拥军.盐荒地棉田长期膜下滴灌对土壤盐分和产量的影响[J].节水灌溉,2020(11):73-77.ZHU Z, TUMARBAY H, ZHU Y J. Effects of long-term mulched drip irrigation on soil salinity and yield in salt wasteland cotton field[J]. Water saving irrigation, 2020(11): 73-77 (in Chinese with English abstract).
- [67] 虎胆·吐马尔白,赵永成,马合木江·艾合买提,等.北疆常年膜下滴灌棉田土壤盐分积累特征研究[J].灌溉排水学报,2016,35(1):1-5.TUMARBAY H, ZHAO Y C, AIHEMAITI M, et al. Study on characteristics of cotton field soil salt accumulation under perennial mulched drip irrigation in Northern Xinjiang[J]. Journal of irrigation and drainage, 2016, 35(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [68] 朱海清,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提,等.长期膜下滴灌棉田土壤水盐空间分布特征研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):221-226.ZHU H Q, TUMARBAY H, AIHEMAITI M, et al. Study on spatial distribution characteristics of soil moisture and salinity in cotton field for long time drip irrigation under film[J]. Journal of water resources and water engineering, 2015, 26(3): 221-226 (in Chinese with English abstract).
- [69] 赵永成,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提,等.北疆常年膜下滴灌棉田土壤盐分年内及年际变化特征研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):130-134,162.ZHAO Y C, TUMARBAY H, AIHEMAITI M, et al. Study on the variation characteristics of soil salt in cotton field during the year and interannual by perennial drip irrigation under plastic film in Northern Xinjiang[J]. Agricultural research in the arid areas, 2015, 33(5): 130-134, 162 (in Chinese with English abstract).
- [70] 朱海清,虎胆·吐马尔白,马合木江·艾合买提,等.干旱区长期膜下滴灌棉田土壤水盐空间分布特征研究[J].节水灌溉,2015(8):54-57,62.ZHU H Q, TUMARBAY H, AIHEMAITI M, et al. Study on spatial distribution characteristics of soil moisture and salinity in drip irrigation under mulch cotton fields in arid area[J]. Water saving irrigation, 2015(8): 54-57, 62 (in Chinese with English abstract).
- [71] 王雅琴,刘洪光,徐万里,等.干旱区膜下滴灌农田不同类型土壤盐分变化分析[J].中国农村水利水电,2017(2):26-30,36.WANG Y Q, LIU H G, XU W L, et al. Research on the changes of soil salinity in different soil type farmland under mulched drip irrigation in arid regions[J]. China rural water and hydropower, 2017(2): 26-30, 36 (in Chinese with English abstract).
- [72] 王雅琴,刘洪光,朱拥军,等.膜下滴灌对不同程度盐荒地改良的研究[J].灌溉排水学报,2014,33(6):101-104.WANG Y Q, LIU H G, ZHU Y J, et al. The research of drip irrigation under plastic film on improving salt wasteland of different degrees[J]. Journal of irrigation and drainage, 2014, 33(6): 101-104 (in Chinese with English abstract).
- [73] 龚江,赵竹青,谢海霞,等.膜下长期滴灌棉田土壤盐分的时空变化规律[J].灌溉排水学报,2014,33(S1):237-239.GONG J, ZHAO Z Q, XIE H X, et al. Temporal and spatial variation of soil salt content in cotton field with long-term drip irrigation under film[J]. Journal of irrigation and drainage, 2014, 33(S1): 237-239 (in Chinese with English abstract).
- [74] 龚江,谢海霞,陶睿,等.不同滴灌年限棉田土壤盐分分布及对棉花生长的影响[J].中国棉花,2012,39(11):16-18.GONG J, XIE H X, TAO R, et al. Distribution of soil salinity with different drip irrigation years and its influence on cotton growth[J]. China cotton, 2012, 39(11): 16-18 (in Chinese with English abstract).
- [75] 孟超然,颜林,张书捷,等.干旱区长期膜下滴灌农田耕层土壤盐分变化[J].土壤学报,2017,54(6):1386-1394.MENG C R, YAN L, ZHANG S J, et al. Variation of soil salinity in plow layer of farmlands under long-term mulched drip irrigation in arid region[J]. Acta pedologica sinica, 2017, 54(6): 1386-1394 (in Chinese with English abstract).
- [76] 郑琦,王海江,李万涛,等.玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素

- 研究[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 214-220. ZHENG Q, WANG H J, LI W T, et al. Factors influencing soil salinization in Manasi River Basin, China[J]. Journal of agricultural resources and environment, 2016, 33(3): 214-220 (in Chinese with English abstract).
- [77] 罗毅. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1679-1688. LUO Y. Long-term effect of drip irrigation on soil salinization in arid oasis[J]. Scientia sinica (terrae), 2014, 44(8): 1679-1688 (in Chinese with English abstract).
- [78] 胡宏昌, 张治, 田富强, 等. 新疆绿洲棉田盐分及作物生长对灌溉方式的响应[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(4): 373-380. HU H C, ZHANG Z, TIAN F Q, et al. Response of soil salinity and crop growth to irrigation methods in Xinjiang[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2016, 56(4): 373-380 (in Chinese with English abstract).
- [79] 范未华, 轩俊伟, 李保国, 等. 长期滴灌棉田表层土壤盐分时空变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 83-89. FAN W H, XUAN J W, LI B G, et al. The impact of long-term drip irrigation on spatiotemporal variation in salt in the proximity of soil surface in a cotton field[J]. Journal of irrigation and drainage, 2020, 39(11): 83-89 (in Chinese with English abstract).

## Progress of effects of long-term field drip irrigation on water and salt balance of farmland in Xinjiang

LIANG Fei<sup>1,2,3</sup>, LI Yunxia<sup>2</sup>, GUAN Xinyuan<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>2,3</sup>, YIN Feihu<sup>2</sup>

1. College of Resources and Environment/Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining 835000, China; 2. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-Fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science/Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832000, China; 3. China Agricultural Reclamation Water Saving Agricultural Industry Technology Alliance, Shihezi 832000, China

**Abstract** The large-scale application of field drip irrigation in Xinjiang has achieved significant economic, social and ecological benefits, but its impact on the water and salt balance in soil and the dynamics of groundwater is different in different regions as well. This article systematically reviewed the history of development and achievements of field drip irrigation in Xinjiang to accurately understand the effect of long-term water-saving irrigation on water-salt balance in soil and groundwater level in Xinjiang. The changes of soil moisture in the topsoil, the depth of underground phreatic water in the farmland in the main irrigation areas in northern and southern Xinjiang, and the redistribution of soil salt in the topsoil since the long-term field drip irrigation were analyzed. Four countermeasures and suggestions are put forward from the perspective of maintaining the sustainable use of water and soil resources in Xinjiang. The groundwater and surface water are overall used to build a safe groundwater level. Scientific irrigation and drainage shall be combined to maintain good farmland topsoil. Unified planning and utilization of saline alkali land in the region is used to realize the sustainable utilization of regional water and soil resources. Water saving and salt reduction is used as the core to improve the utilization efficiency of regional agricultural resources. It will provide reference and direction for further developing sustainable utilization of agricultural water resources in Xinjiang. Water saving and salt reduction is a strategic measure for the sustainable development of agriculture in Xinjiang in the future. However, how to realize the efficient use of water and soil resources in arid saline-alkali areas and explore and follow the scientific issue of water and salt balance deserves long-term attention.

**Keywords** field drip irrigation; water and salt balance; irrigation and salt washing; groundwater level; soil and water resources; water saving and salt suppression

(责任编辑: 赵琳琳)