

任珩, 赵文智, 杨荣, 等. 河西走廊绿洲农业水生产力提升的途径与对策[J]. 中国沙漠, 2024, 44(5): 217-224.

河西走廊绿洲农业水生产力提升的途径与对策

任珩^{ab}, 赵文智^a, 杨荣^a, 杜泽玉^a

(中国科学院西北生态环境资源研究院 a. 中国生态系统研究网络临泽内河流域研究站, b. 甘肃省知识计算与决策智能重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 水生产力指单位体积或价值水资源生产出的产品数量或价值, 提升水生产力是荒漠绿洲可持续发展的重要方向。河西走廊不仅是我国西北地区重要的生态安全屏障, 也是主要的绿洲农业生产区。河西走廊在绿洲灌溉农业、国民经济发展和生态保护建设等方面取得了显著成就, 但农业水生产力低仍深刻地影响着绿洲发展。本文梳理了河西走廊水土资源利用现状, 分析了绿洲土壤有机质和持水力特点及其与水生产力的关系, 提出了通过提升土壤有机质、土壤持水力的途径来提高绿洲水生产力。建议绿洲管理中应尊重绿洲化过程规律, 保护灌漠土资源, 严格限制将有较好生产力的灌漠土耕地转化为非耕地; 根据土壤状况确定优先改良的土壤, 尤其是表层有机质含量1.0%~1.8%和田间持水量20%~25%的土壤; 从地表水配置、耕作、施肥和作物布局优化等多方面提升绿洲土壤有机质和土壤持水力, 以实现河西走廊绿洲农业水生产力提升。

关键词: 河西走廊; 绿洲; 水生产力; 土壤有机质; 田间持水量

文章编号: 1000-694X(2024)05-217-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00108

中图分类号: P349

文献标志码: A

0 引言

水土资源优化配置是干旱区国土利用和可持续发展的核心问题^[1]。西北干旱区虽然拥有中国40%以上的后备耕地资源, 但单位面积土地的水资源占有量仅为全国平均水平的27%, 水土资源的严重不匹配制约着西北干旱区耕地资源的开发^[2-3]。绿洲是干旱区的重要组成部分, 也是干旱区农业发展的核心国土空间^[4-5]。水资源是维持中国以农业生产为主要特征的绿洲系统的关键, 80%以上水资源用于农业生产^[6]。绿洲的扩张不仅加剧了干旱区水资源短缺矛盾, 也影响着绿洲的稳定与可持续^[7]。以最小的水资源消耗获取最大的经济效益是绿洲管理的永恒主题。

水生产力指单位体积或价值水资源生产出的产品数量或价值^[8-9]。提高水生产力则是生产等量粮食过程中消耗较少的水资源, 或者同样多的水资源生产更多的粮食。目前, 水生产力研究集中在农业水生产力计算评估方面。刘鹤等^[8]阐述了农业水生产

力概念的发展过程, 梳理了不同尺度上评估农业水生产力计算方法, 给出了全球范围内4种主要农作物的水生产力分布格局; 苏永中等^[10-15]围绕河西走廊绿洲农田土壤现状与水分生产力开展了大量长期试验, 相关研究对于提高绿洲水分生产力具有重要的实践价值。河西走廊是中国东联西出的重要通道, 也是区域经济发展的重要载体^[16]。1949年后, 河西走廊在绿洲灌溉农业、国民经济发展和生态保护建设等方面取得了显著成就。但是, 河西走廊农业灌溉水生产力仍处在较低的水平, 全球玉米平均灌溉水生产力1.1~2.7 kg·m⁻³^[9], 河西走廊大田玉米灌溉水生产力仅为1.30~1.42 kg·m⁻³^[6]。土壤有机质和持水能力普遍不高始终是绿洲作物产量和水生产力较低的主要原因, 忽视成土过程中的土壤属性和成土规律则是根源。因此, 在深入分析绿洲水土资源生产能力与作用机制的基础上, 提出平衡一个区域有限水资源供给下的地力和水生产力提升的思路、原则和方法, 对于提升干旱地区生态文明建设和经济社会可持续发展具有重要的现实意义。

收稿日期: 2024-05-22; 改回日期: 2024-07-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(23XGL035); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060304); 甘肃省哲学社会科学规划项目(2022YB138)

作者简介: 任珩(1985—), 男, 甘肃文县人, 博士, 研究方向为生态水文与恢复生态学。E-mail: renheng@ilas.ac.cn

通信作者: 赵文智(E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn)

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河西走廊位于中国西北内陆干旱区,东起古浪峡口,西至甘新交界处,长超过1 000 km,跨越青海、甘肃和内蒙古3个省(区),总面积达27.6万 km^2 ^[17]。石羊河、黑河和疏勒河三大内陆河流域的绿洲占整个河西走廊面积的17.4%。石羊河流域位于河西走廊东部,年均气温6~10 $^{\circ}\text{C}$,年降水量50~200 mm。黑河流域位于河西走廊中部,气候干燥,降水少,年均温度6~8 $^{\circ}\text{C}$,年降水量140 mm。疏勒河流域位于河西走廊西部,年降水量40.2~57.5 mm,年蒸发量2 577.4~2 653.2 mm^[18]。河西走廊不仅是中国西北地区重要的生态安全屏障,也是中国西北地区主要的绿洲农业生产区^[19]。河西走廊主要种植作物为制种玉米、小麦等,农作物生产主要依赖于灌溉和化肥投入,以地下水为主要灌溉用水,采用传统耕作方式:作物收获后,进行翻耕,11月进行冬灌,第二年开春,耙耱整地后施基肥、覆膜、播种、灌溉^[20]。

1.2 数据来源

2009—2021年河西走廊武威、金昌、张掖、酒泉和嘉峪关等地理单元小麦、粮食和化肥施用量(折纯量)数据来自于2010—2022年《甘肃发展年鉴》。绿洲耕地质量等级数据来自于第三次国土调查成果。田间持水量数据来源于中国生态系统研究网

络临泽内流河流域研究站在河西走廊中段张掖市临泽县灌区代表性地块开展的0~20 cm土壤耕层持水性能长期实验。在河西走廊中段张掖市临泽县、张掖市高台县等绿洲农田,采用“S型采样”布设方法,采集0~20 cm农田耕层土壤6~8 cm处混合为一个土样,土壤样品装袋备用,共采集2 386个土壤样品。将装袋土壤样品带回室内自然风干,研磨过100目的土壤筛,进行土壤性状测定,其中,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定。

2 河西走廊绿洲农业及水土资源利用状况

2.1 耕地规模与农业生产状况

1975—2019年,河西走廊绿洲面积呈现快速扩张趋势,从14 800 km^2 增加到21 400 km^2 。其中,耕地是绿洲面积增长的主要景观单元,从9 900 km^2 增加到14 600 km^2 ,增加47.4%,扩张面积占据绿洲总扩张面积的70.7%^[19]。河西走廊以粮食作物为主要种植作物,玉米和小麦是绿洲主要的粮食作物,播种面积分别占粮食作物播种面积的56.47%和23.35%。据统计数据,自2009年以来,武威、金昌、张掖、酒泉和嘉峪关等河西走廊五市粮食作物单位面积产量从3 820 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长至4 302 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增幅为12.60%。其中,小麦单位面积产量从5 616 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增长至6 650 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,增幅为18.41%;而玉米在8 460~9 115 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 波动,甚至出现了下降趋势(图1)。

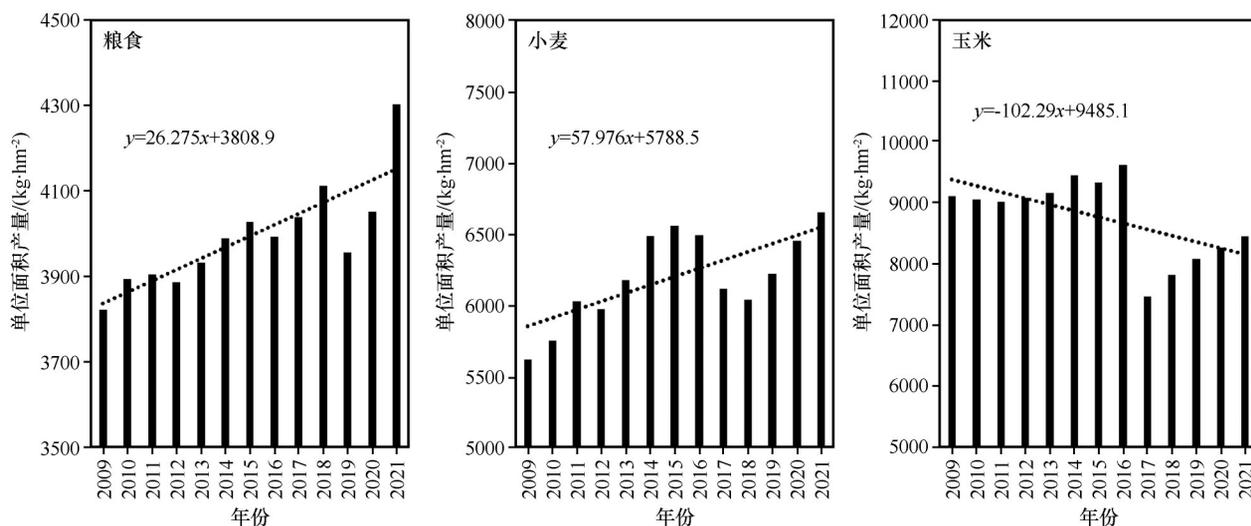


图1 2009—2021年河西走廊绿洲作物单位面积产量

Fig.1 The crop yield in Hexi Corridor oasis from 2009 to 2021

2.2 化肥与水资源利用状况

品种的改良、耕作技术的改进助推了单位面积产量的增加,但节水灌溉力度的加大、化肥施用量的政策调控与优化,以及一些新垦沙地土地生产力低等原因又限制了产量的提升^[21]。近十多年,河西走廊绿洲农用化肥施用量呈现先增长后下降的显著变化趋势。其中,2009—2014年呈现增长趋势,从31.70万t增长至36.25万t,增幅为14.34%;2015—2021年出现下降趋势,从36.25万t下降至24.89万t,降幅为31.33%,且在2016年出现断崖式下降特征(图2)。主要作物玉米2017年以来单位面积产量明显下降(图1)与2016年以来化肥施用量明显下降吻合。

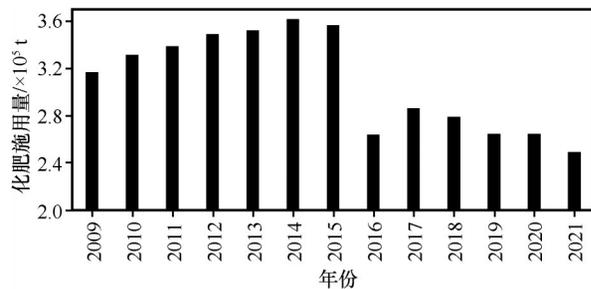


图2 2009—2021年河西走廊绿洲化肥施用量(折纯量)

Fig.2 Fertilizer application rate (pure quantity) in the Hexi Corridor oasis from 2009 to 2021

干旱地区以节水防渗为目标的农业水管理技术提高了水资源利用效率,也达到了单位面积用水量下降的效果。据统计,系列节水灌溉措施在河西走廊绿洲起到显著作用,耕地单位面积用水量呈现逐年下降趋势。2009—2022年,单位耕地耗水量从10 140 m³·hm⁻²降低至6 105 m³·hm⁻²,每公顷耕地灌溉用水量减少了4 035 m³,降幅达到39.85%(图3)。

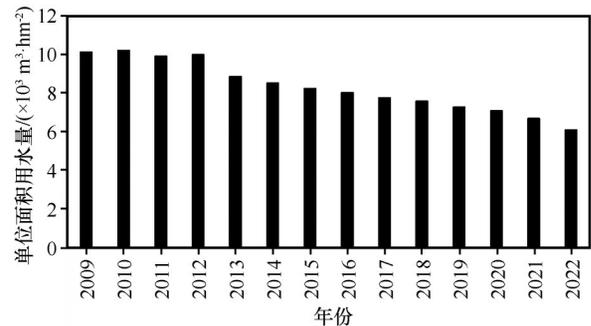


图3 2009—2022年河西走廊绿洲单位面积灌溉用水量

Fig.3 Irrigation water consumption in the Hexi Corridor oasis from 2009 to 2022

3 河西走廊绿洲耕地质量状况

3.1 耕地质量等级状况

第三次国土调查数据显示,河西走廊绿洲耕地均为中等地(10~12等)和低等地(13~15等),绿洲耕地质量普遍不高(图4)。其中,10等耕地面积为29.4万hm²,占河西走廊耕地面积的25.8%;11等耕地为11.85万hm²,占10.40%;12等耕地为40.05万hm²,占35.14%;13等耕地为15.92万hm²,占13.97%;14等耕地为15.46万hm²,占13.57%;15等耕地为1.28万hm²,占1.12%。耕地质量较低主要表现在土壤有机质含量和持水性能不高,进而影响作物的产量和质量,制约干旱区农业的可持续发展。

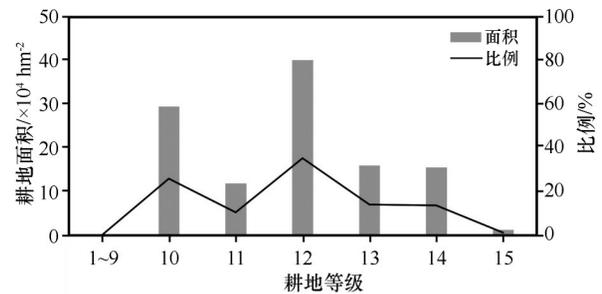


图4 2019年河西走廊绿洲耕地质量

Fig.4 The cultivated land quality in Hexi Corridor oasis in 2019

3.2 耕地有机质状况

土壤有机质是土壤团聚体吸收周围颗粒和有机无机肥过程中形成的胶结物质,是决定土壤质量的关键,对于增长土壤肥力、增强水分持水量与持久性具有重要作用^[22-23]。根据对河西走廊中段张掖市临泽县、张掖市高台县绿洲内农田中2 386个土壤剖面0~20 cm土壤质地分析,土壤有机质平均含量为17.95 g·kg⁻¹。其中,低于土壤有机质含量平均值的样点占52.51%,低于10 g·kg⁻¹调查样点占3.60%,10~18 g·kg⁻¹调查样点占49.79%(图5A)。这说明河西走廊绿洲中段,仍有接近50%的土壤0~20 cm土层土壤有机质含量介于10~18 g·kg⁻¹。

对比控制试验研究表明,在河西走廊绿洲农田中同样的灌水量,玉米的产量随土壤有机质增加而呈增加趋势(图5B),土壤有机质含量在5.03 g·kg⁻¹水平时,玉米产量为10 071 kg·hm⁻²,当有机质含量增加至11.49 g·kg⁻¹时,玉米产量提高至14 714 kg·hm⁻²,增幅达到46.10%。但土壤0~20 cm土层有机质在

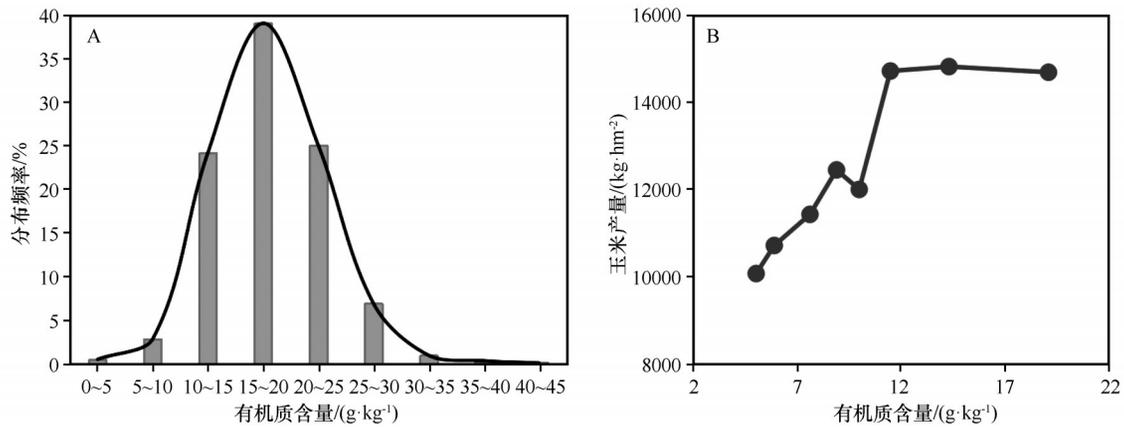


图5 河西走廊土壤有机质含量及相同灌溉条件下玉米产量(图5B根据苏永中等^[15]、李含婷等^[24]、罗跃等^[25]、杨彩红等^[26]文献整理)

Fig.5 Soil organic matter and maize yield under the same irrigation conditions in Hexi Corridor oasis (Fig.5 B is organized by the literature of Su *et al.*^[15], Li *et al.*^[24], Luo *et al.*^[25], Yang *et al.*^[26])

10 g·kg⁻¹以下时玉米产量增加速度明显低于10~20 g·kg⁻¹。

3.3 耕地田间持水量状况

土壤颗粒组成是影响土壤含水率在土壤中分布的主要因素,土层中的砂砾所占百分数越大,黏粒就越少,含水率就越小^[27]。而田间持水能力对于农作物吸收和利用水分的效率和生产能力具有较大影响,直接反映干旱地区农业灌溉水生产力^[28-30]。根据河西走廊中段0~20 cm土层土壤持水性能长期实验结果,河西走廊绿洲农田田间持水量为12.78%~32%,其中,田间持水量20%~25%占52.5%,其次为15%~20%占32.5%,低于15%和高

于25%的仅占5%和10%(图6A)。研究表明,在当地农户正常灌溉水平下(单次灌溉量1 200 m³·hm⁻²),土壤田间持水量在17%~25%时玉米产量随田间持水量增加而缓慢增加,但田间持水量在25%时增速加快^[15,31-37]。其中,田间持水量在17.2%水平时,玉米产量为10 071 kg·hm⁻²。持水量增加至26.2%时,玉米产量提高至14 714 kg·hm⁻²,增幅达到46.10%(图6B)。

3.4 耕地土壤物理性质

土壤容重和孔隙度等土壤物理性质及其分布反映土壤结构的好坏,影响土体中水、肥、气、热、土壤微生物、动物等诸肥力因素的变化和协调^[38-40]。

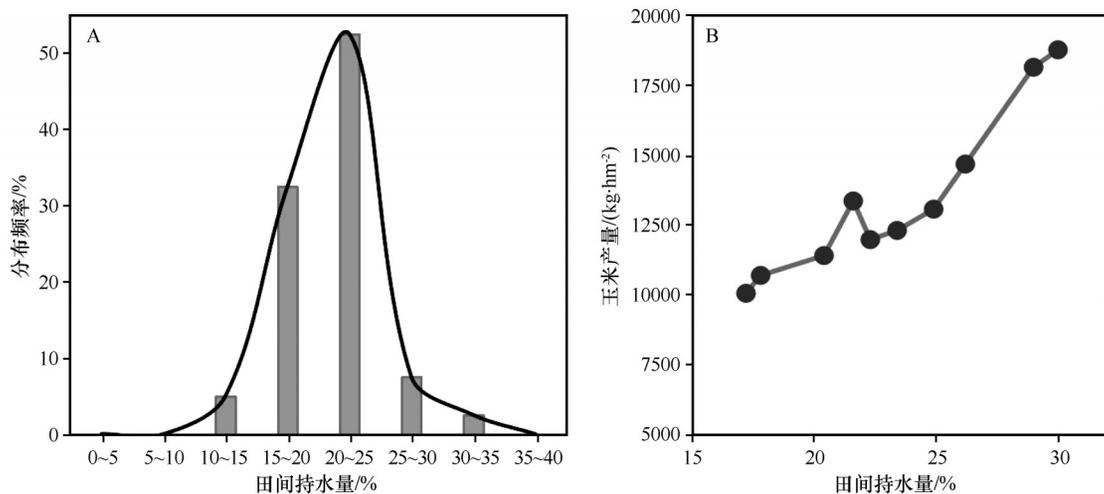


图6 河西走廊土壤田间持水力及相同灌溉条件下玉米产量(图6B根据苏永中^[15]、杨睿等^[31]、王艳丽等^[32]、李菊等^[33]、闵迪等^[34]、李德智等^[35]、李雪等^[36]、任丽雯等^[37]文献整理)

Fig.6 Field capacity and maize yield under the same irrigation conditions in Hexi Corridor oasis (Fig.6B is organized by the literature of Su *et al.*^[15], Yang *et al.*^[31], Wang *et al.*^[32], Li *et al.*^[33], Min *et al.*^[34], Li *et al.*^[35,36], Ren *et al.*^[37])

相关研究表明,1 000年时间尺度上河西走廊0~20 cm表层土壤容重与饱和水力传导度随开垦年限增加显著降低,土壤孔隙度、团聚体稳定性和粉粒含量则显著增加^[41]。其中,开垦最初30年间土壤饱和水力传导度、>0.25 mm干团聚体、>0.25 mm水稳性团聚体、比表面积变化相对较快,分别为 $0.01 \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.58\% \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $0.50\% \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $1.48 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[41]。0~46 a开垦时长的沙地农田0~60 cm土壤剖面研究则显示,土壤砂粒含量随开垦利用年限的增加而逐渐降低,其中开垦初期的10年土壤颗粒平均质量粒径变化不大,土壤持水力和田间持水量较低。但是,利用富含泥沙的河流水灌溉地段的土壤表层细颗粒物质及相应的土壤持水力变化速率明显高于利用井水灌溉的地段^[10,42]。

灌漠土是河西绿洲灌区主要土壤类型^[43],从土壤质地的变化看,绿洲化过程中风沙土发育为绿洲灌漠土大致经历了砂土(砂土和壤砂土)和壤土(砂壤土和壤土),很难出现黏土^[44]。以内流河流域养育的河西走廊绿洲,在河水灌溉和目前的耕作条件下,新垦沙地需要40~70 a才能够得到砂壤土的土壤持水水平。同时,研究表明,砂土玉米的水生产力为 $1.06\sim 1.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,砂壤土玉米的水生产力为 $2.27\sim 2.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,水生产力受土壤条件而不是灌溉量的影响^[6]。因此,将土壤有机质含量相对丰富的河水配置在开垦年限较少的地段,将井水配置在开垦年限较长的绿洲地段,可以有效提升新开垦绿洲农田的有机质含量。

4 河西走廊绿洲水生产力提升途径

近几十年来,河西走廊绿洲开垦了大面积耕地,荒漠土壤开垦为农田后,长期耕作活动增加了土壤有机质和土壤养分含量,改变了土壤粗粒、细粒物质的组成比例,但这种土壤物质组成变化明显慢于大量有机无机肥、土壤微生物、动物等诸肥力因素的影响,出现了土壤质地改变显著滞后于土壤养分积累速率的现象^[10,45]。土壤中粉砂质黏粒含量高影响土壤水分的获取、补给、贮存和传输,决定了土壤水分调节能力的强弱,对植被生长及农作物生产有重要影响。

4.1 提高土壤有机质含量

据调查,土壤砂粒含量超过50%的耕地约占河西走廊绿洲灌区总面积的40%,较高的土壤砂粒含

量决定了较低的土壤有机质和养分水平,以及极低的持水能力^[15]。河西走廊绿洲耕地土壤表层0~20 cm有机质平均含量平均为1.8%,其中介于1.0%~1.8%的约50%。在表层0~20 cm土壤有机质含量1.0%~1.8%的区间内,水生产力增加速率显著大于0.5%~1.0%的土壤。因此,对于河西走廊土壤利用管理的启示是优先改良占绿洲50%左右的0~20 cm土层有机质含量为 $10\sim 18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土地,实现通过提高土壤有机质含量增加地力、提高绿洲水生产力的耕地改良目标。临泽内流河流域研究站通过农田长期实验发现,提高土壤有机质可以从以下3个方面着手:一是增加有机质的输入源。通过施用农家肥、秸秆还田、增施有机肥等途径增加各种类型有机质的输入,是提升土壤有机质含量的最有效途径。 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$: $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$: $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮、磷、钾化学肥料用量配合施用 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 农家肥,可在作物增产10%的条件下,提升土壤有机质含量 $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[46];二是利用箭筈豌豆、毛叶苕子等还田绿肥作物实行草田轮/间作。箭筈豌豆、毛叶苕子等还田绿肥作物轮作后作物产量可提升11.7%~31.5%,土壤有机质含量提升6%~19%^[47];三是秸秆氨化还田。将约30%的化肥用量用于作物秸秆氨化,氨化秸秆还田后可使作物产量提升12%,土壤有机质含量提高18%^[48]。

4.2 提高土壤持水力

由于提高土壤有机质投入较多,特别是绿洲可供提升有机质含量的有机肥料有限,因而在优先治理有机质含量 $10\sim 18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土地的基础上,应重视持水量与作物产量的关系对绿洲水生产力的影响。河西走廊绿洲田间持水量17%~20%的耕地水生产力增速较小,而在田间持水量大于25%时,土壤水生产力随田间持水量的增加显著增加,应考虑改良田间持水量为20%~25%的土壤。可以通过以下两个方面提高土壤持水能力:一是提升耕地管理水平,改善土壤结构。①推广免耕少耕等措施减少对土壤结构的扰动,形成土壤团聚体稳定的外部环境条件。②通过输入有机质、改善土壤微生物等手段,加快土壤团聚体和土壤胶结物质的形成。在河西走廊绿洲试验表明,长期有机无机肥配施增加了土壤胶结物质的形成,使土壤团聚体的稳定性(平均质量直径)从0.24提高至0.45,提高了88%^[49]。③通过作物种类和种植模式的调整,增加土壤根系

生物量,改善土壤根系的空间分布特征。植物根系是土壤团聚体形成和稳定的重要影响因素,它不仅可以通过压缩和缠绕等使根际周围的细小颗粒不断形成较大颗粒,还可以通过对土壤水分的吸收,进一步增加土壤的持水能力^[50]。二是就地取材,施加添加凹凸棒等泥土矿物的肥料和土壤保水剂。凹凸棒具有独特的纤维网状结构和显著的胶凝特性,施用于砂质土壤,对促进土壤团聚体形成和结构发育、提升土壤持水保肥性能和减少养分淋溶损失有积极作用。如Liu等^[51]的研究结果表明,化肥减量20%配施凹凸棒粉6 000 kg·hm⁻²可通过改善土壤持水力使玉米水生产力提升8.6%。

5 提升河西走廊绿洲水生产力建议

5.1 重视通过提升土壤有机质和土壤持水力的途径提高绿洲水生产力

提高绿洲水生产力是绿洲建设和管理的永恒目标。以往在提高水资源利用效率方面,重视农业节水、工程节水和管理节水,工程配置和投资上也基本围绕这三方面展开。但是,影响水生产力的主要因素是土壤持水力,在一定条件下与灌溉量关系不大。通过提高土壤有机质和土壤持水力,可以有效地提升河西走廊绿洲水生产力、增加单位水的产量,同样可以达到节水和提高水资源利用的目的。在河西走廊目前传统农业节水潜力不大的情况下,重视从改善土壤条件去提高水资源利用率恰逢其时。因此,应在基本农田建设和高标准农田建设中加强土壤有机质和持水力的改善,将提高土壤水生产力的投入纳入到高标准农田建设的预算之中。

5.2 保护灌漠土资源,严格限制灌漠土耕地资源转化为非耕地

灌漠土是保障河西走廊粮食安全重要的农业生产要素,相较于绿洲化过程出现的其他类型土壤,在有机质含量和持水率等性能方面具有明显优势,具有较高的生产力。加强灌漠土资源的保护,特别是在土地利用方式的转变中应给予重视,尽量避免将有一定耕作历史的灌漠土耕地转化为非耕地,维持绿洲耕地生产的稳定性,尽可能在较高质量的灌漠土开展农业生产,也是提高河西走廊绿洲水生产力的有效途径。同时,绿洲土壤发育过程缓慢,尤其是绿洲垦殖初期的50~70 a,土壤有机质和

持水率增加均较慢。尽管人为干扰可以在一定程度上改变绿洲土壤的形成速率,但能够显著促进灌漠土形成速率及提高灌漠土生产力经济有效的方法技术并不多。因此,在改善土壤有机质、土壤田间持水力等技术研发的基础上,构建包含土壤生物、土壤微生物等在内的支撑土壤生产力可持续性发展和加快土壤发育速率的技术体系也是提升河西走廊绿洲水生产力的关键。

5.3 重视从耕作、施肥和作物布局优化等方面提高土壤水生产力

通过有机肥和化肥的混合使用、秸秆还田、作物与豆科植物间作、新垦绿洲种植苜蓿,以及利用当地的凹凸棒黏土矿物作为肥料添加剂等方法,提高土壤有机质和田间持水力。因地制宜推广少耕和免耕技术,在一定程度上也能够改善土壤持水力。此外,持水率低的土壤适宜于耐旱性能较好的作物,合理布局,选择在土壤持水力高的土壤中种植传统的玉米、小麦等作物,在土壤持水力相对较低的土壤中种植棉花等作物。

参考文献:

- [1] 赵英,王海霞,王毅,等.黄河流域农业水资源高效利用与优化配置研究[J].中国工程科学,2023,25(4):158-168.
- [2] 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.
- [3] 张甘霖,吴运金,赵玉国.基于SOTER的中国耕地后备资源自然质量适宜性评价[J].农业工程学报,2010,26(4):1-8.
- [4] Chu P C, Lu S H, Chen Y C. A numerical modeling study on desert oasis self-supporting mechanisms[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1/4):256-276.
- [5] 赵文智,杨荣,刘冰,等.中国绿洲化及其研究进展[J].中国沙漠,2016,36(1):1-5.
- [6] 胡广录.干旱区绿洲水分生产率分布格局及影响因素研究[M].兰州:甘肃人民出版社,2011.
- [7] 黄晓荣,姜健俊,裴源生,等.基于生态保护的宁夏天然绿洲生态需水研究[J].水科学进展,2006,17(3):312-316.
- [8] 刘鹄,赵文智.农业水生产力研究进展[J].地球科学进展,2007,21(1):58-65.
- [9] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69: 115-133.
- [10] 苏永中,杨荣,刘婷娜.施肥对新垦绿洲风沙土肥力及碳积累的影响[J].中国沙漠,2019,39(3):1-6.
- [11] 苏永中,张智慧,杨荣.黑河中游边缘绿洲沙地农田玉米水氮配合试验研究[J].作物学报,2007(12):2007-2015.
- [12] 苏永中,王芳,张智慧,等.河西走廊中段边缘绿洲农田土壤

- 性状与团聚体特征[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4): 741-748.
- [13] Su Y Z, Wang X F, Yang R, et al. Effects of sandy desertified land rehabilitation on soil carbon sequestration and aggregation in an arid region in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(11): 2109-2116.
- [14] Su Y Z, Yang R, Liu W J, et al. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated cropland in arid region, China[J]. *Soil Science*, 2010, 175(5): 246-254.
- [15] 苏永中, 杨荣, 刘文杰, 等. 基于土壤条件的边缘绿洲典型灌区灌溉需水研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6): 1128-1139.
- [16] 谢强, 方创琳. 河西走廊生态重建与经济可持续发展情势分析[J]. 干旱区地理, 2001, 24(1): 74-79.
- [17] 蒙吉军, 李正国. 河西走廊景观类型变化的社会经济驱动力研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 56-62.
- [18] 何晨晨, 王振亭, 张春来. 河西走廊绿洲外缘典型风沙防护体系的功能稳定性评估[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2024, 53(4): 549-555.
- [19] 赵文智, 任珩, 杜军, 等. 河西走廊绿洲生态建设和农业发展的若干思考与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 424-434.
- [20] 苏永中, 张珂, 刘婷娜, 等. 免耕旧膜再利用对玉米产量及灌溉水生产力的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5): 491-498.
- [21] 康绍忠, 粟晓玲, 杨秀英, 等. 石羊河流域水资源合理配置及节水生态农业理论与技术集成研究的总体框架[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(1): 1-9.
- [22] 曹晓风, 孙波, 陈化榜, 等. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336-348.
- [23] 陈仕阳, 杨荣, 苏永中, 等. 河西绿洲农田土壤呼吸特征及其对长期施肥的响应[J]. 中国沙漠, 2022, 42(3): 178-186.
- [24] 李含婷, 柴强, 胡发龙, 等. 间作绿肥弥补减施氮肥引起的玉米产量损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1329-1340.
- [25] 罗跃, 张久东, 周国朋, 等. 河西绿洲灌区间作绿肥及其不同利用方式对玉米产量及土壤肥力的提升效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 402-413.
- [26] 杨彩红, 耿艳香, 伏星舟, 等. 免耕轮作对西北荒漠绿洲小麦、玉米产量和光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 11-19.
- [27] 李王成, 冯绍元, 康绍忠, 等. 石羊河中游荒漠绿洲区土壤水分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 138-144.
- [28] Connolly R D. Modeling effects of soil structure on the water balance of soil-crop systems: a review[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48(1/2): 1-19.
- [29] Bossio D, Geheb K, Critchley W. Managing water by managing land: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4): 536-542.
- [30] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 742-746.
- [31] 杨睿, 范军亮, 赖珍林, 等. 河西地区滴灌春玉米对不同灌溉决策方法的响应[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(9): 966-972.
- [32] 王艳丽, 张富仓, 李菊, 等. 灌溉和施磷对河西地区春玉米生长、产量和磷素利用的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1309-1320.
- [33] 李菊, 张富仓, 王艳丽, 等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8-20.
- [34] 闵迪, 王增红, 李援农, 等. 不同灌水和施氮水平对河西春玉米水氮利用效率和经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 153-160.
- [35] 李德智, 佟玲, 吴宣毅, 等. 不同滴头流量和灌水频率对玉米产量、耗水及水分利用效率的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 208-215.
- [36] 李雪, 尹光华, 马宁宁, 等. 浅埋滴灌水氮运筹对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 172-178.
- [37] 任丽雯, 刘明春, 王兴涛, 等. 拔节和抽雄期水分胁迫对春玉米生长和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(1): 17-22.
- [38] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [39] Liu L J, Ren W, Zhao W Z, et al. Cropping systems alter the biodiversity of ground-and soil-dwelling herbivorous and predatory arthropods in a desert agroecosystem: implications for pest biocontrol[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 266(1): 109-121.
- [40] Chen L F, He Z B, Zhao W Z, et al. Soil structure and nutrient supply drive changes in soil microbial communities during conversion of virgin desert soil to irrigated cropland[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(4): 768-781.
- [41] 王惠, 赵文智. 绿洲化过程中绿洲土壤物理性质变化研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1109-1117.
- [42] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
- [43] 吴科生, 车宗贤, 包兴国, 等. 河西绿洲灌区灌漠土长期秸秆还田土壤肥力和作物产量特征分析[J]. 草业学报, 2021, 30(12): 59-70.
- [44] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.
- [45] Li X G, Li F M, Rengel Z, et al. Cultivation effects on temporal changes of organic carbon and aggregate stability in deserts soils of Hexi Corridor region in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91(1/2): 22-29.
- [46] Yang R, Su Y Z, Yang Q. Crop yields and soil nutrients in response to long-term fertilization in a desert oasis[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 83-92.
- [47] Yang R, Song S J, Chen S Y, et al. Adaptive evaluation of green manure rotation for a low fertility farmland system: impacts on crop yield, soil nutrients, and soil microbial community[J]. *Cat-*

- ena, 2023, 222:106873.
- [48] Zhou L, Chang W, Yang R, et al. Ammoniated straw incorporation coupled with N management synergistically enhanced soil structure and crop productivity in a desert oasis farmland [J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(16):4977–4989.
- [49] Niu Z R, An F J, Su Y Z, et al. Effect of long-term fertilization on aggregate size distribution and nutrient accumulation in aeolian sandy soil [J]. *Plants*, 2022, 11(7):909.
- [50] 刘均阳,周正朝,苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3):267–273.
- [51] Liu T N, Su Y Z, Niu Z, et al. Attapulgitic application improves maize yield, water, and fertilizer utilization efficiency in newly cultivated sandy farmland in northwestern China [J]. *Arid Land Research and Management*, 2023, 37(3):408–426.

Pathway and countermeasures to improve agricultural water productivity in oasis of Hexi Corridor

Ren Heng^{ab}, Zhao Wenzhi^a, Yang Rong^a, Du Zeyu^a

(a. Linze Inland River Basin Research Station / b. Key Laboratory of Knowledge Computing and Intelligent Decision, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Water productivity refers to the quantity or value of products produced by per unit volume or value of water resources. Improving water productivity is an important direction for the sustainable development of desert oasis. The Hexi Corridor is not only an important ecological barrier of northwestern China, but also a typical irrigated agricultural area in the northwestern China. After more than 70 years of development, the Hexi Corridor has made very significant achievements in oasis irrigation agriculture, national economic development and ecological protection construction. However, low agricultural water productivity still affects the development of oasis profoundly. This paper combs the current status of utilization of water and soil resources in the Hexi Corridor, analyzes the characteristics of oasis soil organic matter and water holding capacity as well as their relationships with water productivity, and proposes the approaches to improve oasis water productivity by increasing soil organic matter and soil water holding capacity. In order to protect the safety and stability of the Hexi Corridor ecological barrier and the sustainable development of oasis agriculture, it is recommended that respecting the process of oasisization in oasis management, protecting irrigated desert soil resources, and restricting the conversion of irrigated desert soil cultivated land with good productivity into non-cultivated land strictly; determining the areas that should be prioritized for improvement according to the soil condition, especially the soil with surface organic matter of 1.0%–1.8% and field capacity between 20% and 25%; in order to realize the improvement of agricultural water productivity in the oasis of the Hexi Corridor.

Key words: Hexi Corridor; oasis; water productivity; soil organic matter; field capacity