

气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径

王红丽¹, 张绪成¹, 魏胜文^{2*}

(1.甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃省农业科学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:通过分析气候变化对西北半干旱区旱作农业生产的影响、当前生产中应用的主要抗旱技术、提高粮食生产能力的机理等, 以探索应对未来气候变化下西北旱作农业发展的技术途径, 为推动未来旱作农业发展、保障粮食安全提供参考。结果表明, 未来气候变化对西北半干旱区作物生长的影响主要有3方面: 一是气温升高导致作物产量降低, 品质下降; 二是降水量和降水格局变化引发的作物干旱/洪涝问题; 三是极端气候引发的气象灾害导致粮食生产波动。为适应或缓解上述不利影响, 提高有限降水利用效率、优化土壤结构、提升土壤肥力、增强作物-土壤体系抵御环境变化的能力, 缓解未来气候变化对西北半干旱区粮食生产的影响, 应主要从3方面入手: (1)覆盖聚集降水, 提高土壤蓄水保墒能力, 改变土壤水分分配, 调控土壤水分运移并提高降水入渗效率, 从而“调水”以适应降水变化; (2)土壤培肥优化土壤结构、改良土壤理化性质, 从而“改土”提高作物-土壤体系对环境变化的适应能力以应对未来气候变化, 稳定旱作农业生产力; (3)通过“调水”和“改土”技术集成, 形成“水土协调”技术体系以综合应对未来气候变化, 减缓未来气候变化对西北半干旱区粮食生产的不利影响。

关键词:气候变化; 旱作农业; 影响; 解决途径

中图分类号: S162.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)06-0517-08

doi: 10.13254/j.jare.2015.0093

Impact of Climate Change on Rain-fed Farming and Response Solutions in Semiarid Area of Northwest China

WANG Hong-li¹, ZHANG Xu-cheng¹, WEI Sheng-wen^{2*}

(1. Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The impact of climate change on the agriculture production in semi-arid areas of Northwest, the major drought-resistant technology, the mechanism of increasing grain production were analyzed to explore technical solutions to retort the future climate change, future development of rainfed agriculture, and provide reference for food security. The results showed that the impact of future climate change on crop growth had main three aspects: Firstly, higher temperatures resulted in lower crop yield and quality decline; Secondly, changes in precipitation and precipitation patterns resulted in drought/flooding problems; Thirdly, meteorological disasters caused by extreme weather lead to fluctuations of food production. To adapt or mitigate these adverse effects, increase use efficiency of limited rainfall, optimize soil structure, improve soil fertility, enhance withstanding environmental change ability of crop-soil system, mitigate the impact of future climate change on food production in semi-arid region of Northwest China, the mainly solutions were: (1) Covering gathered precipitation, improve the ability to accumulate soil moisture, change the distribution of soil moisture, regulate the migration and improve the infiltration of precipitation, thus “adjusting water” to adapt to precipitation changes; (2) Optimizing soil structure, physical and chemical properties by soil fertilization, thus “regulating soil” to improve the ability of crop-soil system against to environmental changes, in order to stabilize productivity of rainfed agriculture; (3) Integrate “adjusting water” and “regulating soil” technology, forming technical system of “coordination of water and soil” to comprehensively response to future climate change, mitigate the adverse impact of future climate change on food production in semi-arid region of Northwest, China.

Keywords: climate change; rain-fed farming; impact; solutions

自1975年以来全球大气中CO₂、CH₄及氮氧化物浓度显著增加, 预测21世纪中期大气CO₂浓度将达

到550 μmol·mol⁻¹[1]。大气CO₂浓度的增加会引起全球气温升高^[2]、降水量和降水格局发生变化, 同时增加生态需水量及农业灌溉需水量^[3], 水资源缺乏将成为世界性的问题, 而且随着人口剧增和工业的发展, 农业用水的缺口将逐渐加大^[4]。在缺水和人口增加的双重压力下, 如何保障粮食安全, 将是未来人类面临的重大生存问题。

收稿日期: 2015-04-02

基金项目: 公益性行业(农业部)科研专项(201203031); 甘肃省杰出青年基金项目(1210RJDA011)

作者简介: 王红丽(1980—), 女, 山西定襄人, 博士, 主要从事作物栽培学与生理生态学研究。E-mail: zhshwl@163.com

* 通信作者: 魏胜文 E-mail: 13893620312@126.com

目前灌溉农业的粮食增产潜力已发挥较高水平,未来靠提高灌区单产来提高粮食总产难度很大,所以发展旱作农业将是未来保障粮食安全的主要方向。旱作农业生产受自然条件的强烈限制,加之受全球气候变化的影响,旱作农业生产力的波动幅度大,因此,当前针对旱作农业需要解决的问题主要在 2 个方面,一是提高生产力水平,二是稳定增强农业生产体系对环境的适应能力。本文立足全球气候变化条件下我国典型旱作区域——西北黄土高原旱作区的未来旱作农业生产可能面临的问题,结合当前旱作农业生产中应用的抗旱技术,分析应对未来全球气候变化条件下旱作农业发展的措施,以期对未来发展旱作农业、保障粮食安全提供参考。

1 气候变化对西北半干旱区旱作农业生产的影响

全球气候变化已逐渐影响人类的生存环境,全球气温升高、降水量和降水格局变化、极端气候频发等将对旱作农业产生不可忽视的影响。

1.1 全球气候变暖将导致粮食产量降低、品质显著下降

全球气候变暖将造成水资源短缺、土地退化、干旱地区面积增加等一系列问题,严重影响粮食生产。秦大河^[3]和林而达等^[5]的模拟研究表明,未来 30 年内我国种植业产量在总体上将因全球变暖而可能会减少 5%~10%,其中小麦、水稻和玉米三大作物均以减产为主^[3,6]。自 1951 年以来甘肃省气温上升速率约为 0.4~0.8 °C·10 a⁻¹,干旱面积逐步扩大,降水则逐步减少^[7],导致农作物养分积累时间缩短,品质降低^[8]。甘肃省 1971—2005 年粮食减产量的变化随着 3—10 月全省平均气温的升高而变化,随气温升高,暖干化趋势加剧,气温升高造成的干旱灾害严重影响粮食生产,尤其是 1990 年以来平均气温呈明显持续上升的趋势,粮食减产量也呈明显持续增加趋势,平均气温与粮食减产量呈较显著正相关,表明气候变暖使干旱灾害对农作物产量的影响程度加大,直接影响粮食生产安全(表 1)^[9]。同时,温度升高及昼夜温差缩小不利于作物品质形成,大气中 CO₂ 浓度增高也对品质造成负面影响。二者的交互作用对不同作物品质的影响尽管不同,但负面影响居多,并直接影响营养品质。比如温度升高和 CO₂ 浓度增加的环境中水稻籽粒蛋白含量降低,稻米的垩白率和垩白度极显著提高,整精米率极显著下降,蛋白质和氨基酸含量明显下降^[10-11]。

表 1 甘肃省 1971—2005 年大旱年农作物受灾情况及旱灾类型
Table 1 Disaster situation of crops caused by drought and drought type in the disastrous drought years in Gansu Province from 1971 to 2005

年份	受灾面积/10 ⁴ hm ²	受灾率/%	粮食减产量/10 ⁴ kg
1971	115.4	29.2	71 970
1972	107.1	26.8	68 140
1973	110.0	27.8	70 520
1981	117.5	29.7	124 120
1982	130.3	31.9	131 450
1987	115.1	26.7	110 120
1991	106.1	20.4	65 000
1992	102.4	22.0	40 000
1994	116.6	22.4	52 000
1995	208.7	45.3	150 000
1997	157.4	33.8	80 000
2000	162.2	34.9	135 000

注:数据来源于文献[9];粮食减产量计算方法:减产量=实际产量×减产率/(1-减产率);减产率=(受灾面积×20%+成灾面积×45%)/播种面积。

1.2 降水量减少和降水格局变化导致气象灾害多发,粮食产量波动

甘肃省位于西北内陆地区,大部分属于干旱半干旱气候,生态环境脆弱,是气象灾害的频发区,全省气象灾害占整个自然灾害的 88.5%,高出全国平均水平 18.5%。干旱出现频率高,占气象灾害的 70%以上,是最主要的气象灾害^[12]。据统计,1960—2005 年近 46 年来甘肃省平均降水量呈减少趋势,线性趋势变化率为 -5.4 mm·10 a⁻¹^[9],导致干旱受灾面积、频率和强度增加,20 世纪 60 年代发生旱灾 1 次,受灾面积 114.10×10⁴ hm²;70 年代发生旱灾 3 次,受灾面积 332.50×10⁴ hm²;80 年代发生旱灾 3 次,受灾面积 362.90×10⁴ hm²;90 年代发生旱灾 5 次,受灾面积 691.20×10⁴ hm²;21 世纪发生旱灾 6 次,受灾面积 404.51×10⁴ hm²,旱灾类型由 20 世纪 60 年代的春季初夏旱逐渐过渡到四季均旱,作物生长受限,20 世纪 60 年代至 21 世纪因旱灾导致粮食减产量总计达 1 224.36 万 t^[9]。另外,近几年,全球气候变化改变了区域降水量和降水格局,“南旱北涝”趋势渐显,根据中国国家气候中心监测显示,2013 年 7 月以来,全国降水总体北多南少,长江中下游地区降水量仅 116.6 mm,较常年同期偏少 50%,为 1951 年以来最少;珠江和淮河流域的降水量分别偏少了 17%和 16%。截至 2013 年 8 月 15 日,与 8 月 6 日相比,长江中下游及西南地区十日之

内农作物受旱面积增加117.4万 hm^2 ,粮食产量受损。“南旱”的同时,中国北方地区却迎来了丰沛的降水,引起洪涝,粮食产量受损。2013年7月1日以来,全国平均降水量169.2mm;其中,东北降水量287.3mm,较常年同期偏多36%,华北、西北也分别偏多35%和36%,以中国粮食主产区东北地区为例,黑龙江、嫩江、松花江连日出现超警戒水位,汛情导致粮食生产损失惨重。以灾情最为严重的黑龙江为例,截至2013年14日,洪涝、风雹共造成该省农作物受灾面积241.8万 hm^2 ,农作物绝收面积61万 hm^2 ,直接经济损失111亿元人民币。对于“十年九旱”的甘肃省而言,近几年降水的增大整体上对粮食生产较为有利,据省统计局抽样调查2013年全省粮食总产较2012年增加80万t左右,2014年比2013年增加19.8万t,粮食生产实现“十一连增”。

1.3 极端气候使西北旱作区农业生产系统脆弱性加大,不稳定性加强

我国处于自然灾害频繁发生、全球气候显著的区域,极端气温、暴雨洪涝、冷害低温、干热风、雷暴、冰雹等极端事件屡屡发生,对我国农业,尤其是黄土高原旱作区农业生产造成了很大的威胁^[13-14]。据有关数据显示:20世纪我国发生的气象灾害占世界总数的

30%左右,并且受灾面积呈直线上升趋势增加^[15]。2007年,全国因低温冷冻灾害和雪灾造成农作物受灾面积达 $407.2 \times 10^4 \text{hm}^2$,直接经济损失186.5亿元^[16]。2013年陕西省气温异常偏高,降水时空分布严重不均,总体呈现降水北多南少的特征,其中延安7月平均降水量是常年同期5倍左右,全省各类自然灾害及衍生灾害共造成农作物受灾151.612万 km^2 ,绝收17.527万 km^2 ,直接造成农业经济损失98.78亿元^[17]。甘肃省生态环境脆弱,受气候变化影响严重,旱灾、水灾、风雹灾等极端气候发生率高。据统计,甘肃省1960—2010年白天极端高温天数、夜间极端高温天数、 $\geq 35^\circ\text{C}$ 高温天数均呈增加趋势^[18](图1)。1978—2012年全省旱灾、水灾、风雹灾、霜冻灾等极端气候造成的受灾面积3877.14万 hm^2 ,成灾面积2894.09万 hm^2 ,粮食作物减产5~8成的面积达692.99万 hm^2 ,减产8成以上的达395.42万 hm^2 ,经济作物减产5~8成的面积达107.99万 hm^2 ,减产8成以上的达68.72万 hm^2 ^[19]。

未来北方大部分地区将持续暖干化,同时随着 CO_2 浓度的升高,酸雨形成,最后影响臭氧层,自然灾害就会持续发生,西北半干旱区粮食生产系统的脆弱性将进一步加大,不稳定性将进一步加强。

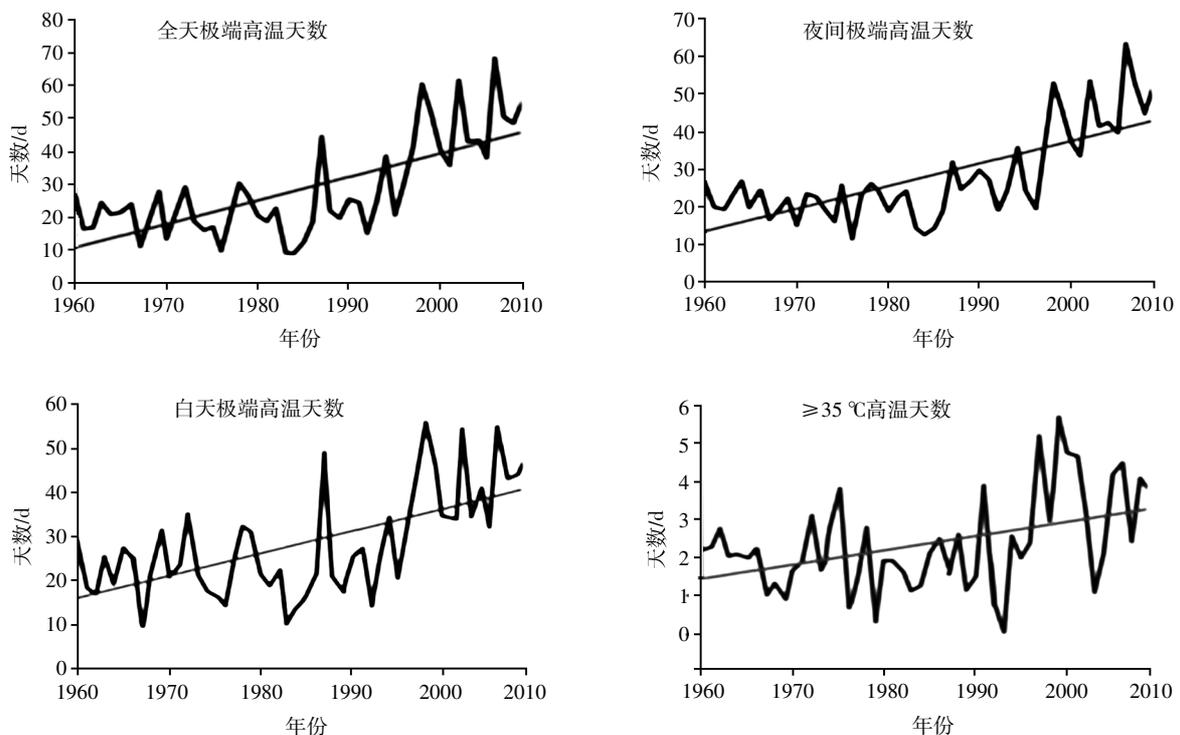


图1 甘肃省1960—2010年极端高温天气变化趋势

Figure 1 Extreme high temperature weather change from 1960 to 2010 in Gansu Province

2 西北半干旱区旱作农业生产中应用的主要抗旱技术

2.1 覆盖技术保水抗蚀、调温促渗、调水促用,保产保收

目前,西北半干旱区大面积推广的覆盖技术主要有:砂石地膜覆盖、全膜双垄沟播、全膜覆土穴播和秸秆覆盖技术。西北半干旱区因生态脆弱、风沙大、降水量少而不均,而且降水分布与作物需水错位,导致粮食生产产出低、波动性大。通过地表覆盖技术,抑制地表无效蒸发,促进作物对水分的利用,提高水分利用效率,调节土壤温度,为作物生长提供稳定的温度环境;再者能提高降水入渗率,调节土壤水分时空分布,保证粮食作物稳产高产。研究显示,砂石地膜覆盖种植方式,其最大的特点是把传统砂田栽培同地膜覆盖有机结合起来,抑蒸保墒,最大限度地接纳雨水、促进入渗,特别是将 4—6 月 10 mm 以下的无效降水转化为有效降水^[20-21],避免水蚀、风蚀,从而保土保肥^[22-23]、保水保墒、增温^[24]、防冻^[25]、促早熟、提品质^[25-26],使作物早熟、高产和优质,一般年份,粮食作物产量可比土田高 1~3 倍,大旱之年裸地作物颗粒无收,而砂田中还能有一定收成^[22];地膜覆盖能提高玉米、小麦等作物生长前期土壤平均温度 3℃左右^[27],利于作物出苗和前期生长;在秋季和早春全地面覆膜,可使土壤水分蒸发减少 80%左右,实现秋雨春用,同时保蓄更多水分供后期使用,促进籽粒形成和灌浆,显著提高产量和水分利用效率^[28-32],其粮食稳产增产效果在干旱年份愈加显著^[27-35];秸秆(残茬)覆盖减少土壤水分蒸发、调节地温、改良土壤、培肥地力^[36-38],也是解决西北半干旱区旱与薄的有效途径。秸秆(残茬)覆盖后,小麦田平均减少蒸发 64 mm,玉米田平均减少 56 mm,果园可降低 60%无效蒸发,同时增加降雨入渗 24.88 mm 左右^[39]。秸秆(残茬)覆盖对地温的调节作用主要表现在冬季提高地温,夏季降低地温^[40],增加降雨入渗率,对水分不足起到了弥补作用^[41]。研究显示:近年来西北半干旱区广泛采用的全膜双垄沟播栽培模式,玉米穗粒数、穗粒重、百粒重等显著增加,产量较不覆盖增加 310.0%~356.2%;玉米采用全沙覆盖平作后产量较不覆盖增加 224.3%~256.1%^[24,31];小麦全膜覆土穴播和全沙覆盖分别较不覆盖产量提高 48.78%~857.90%和 9.41%~702.23%,而且越在干旱年份,全膜覆土穴播和全沙覆盖增产幅度越大^[35]。可见,覆盖技术利于作物生长、作物合理群体构建,能提高作物-土壤体系抵御环境变化的能力,能增强粮食生产系统对

极端气候事件的防御能力,保障粮食稳产高产。

2.2 土壤培肥技术提升地力,保障西北旱作区粮食持续增产

目前西北半干旱区大面积推广的土壤培肥技术主要有:合理施肥(有机无机配施、增施有机肥、测土配方施肥)、免耕、机械深松耕和秸秆还田。研究显示,合理施肥和增施有机肥可使土壤有机质提高 3.06%~27.78%,易氧化有机质增加 10.91%~20.67%,浸提腐殖酸提高 1.43%~14.28%,结合态腐植酸的松/紧比值提高 0.07~0.19,HA/FA 比值提高 0.07~0.24,并且能改善土壤的 N、P、K 营养状况、土壤水分和土壤孔隙状况,提高了土壤有机质活性和改善土壤肥力状况^[42]。免耕和秸秆还田可改善土壤结构,提高土壤养分含量^[43],不同程度地增加土壤有机质和速效氮、磷、钾^[44]、全氮、全磷、全钾、碱解氮含量^[45],有利于土壤的固碳作用,提高土壤保水保肥能力,还可以改良土壤结构,增强土壤抗蚀抗旱性能,增加作物产量,改善作物品质^[46]。深松+秸秆还田因深松在不破坏表土层的基础上打破犁底层,有利于作物根系下扎生长,根系残茬及大量根系分泌物也加剧了微生物繁衍,利于秸秆的腐解^[47],使土壤耕层总有机碳(TOC)储量增加 5.2%~18.0%,土壤溶解性有机碳(DOC)积累增加 200%左右,颗粒有机碳和矿物结合有机碳等土壤活性有机碳组分积累均不同程度增加^[48-49]。同时,秸秆腐烂翻压后提高了土壤肥力,调整土壤孔隙度,保持良好的土壤结构,有效增加表层土壤的有机质含量,为作物高效利用自然降水提供了良好的土壤环境。土壤肥力的提高能够提高水分的利用率,从而使作物得以充分利用有限的水分,稳定产量。目前研究表明上述提升土壤肥力的土壤培肥技术,均能较好解决西北半干旱区土壤旱与薄的问题,实现西北半干旱区粮食稳产增产。

2.3 作物种植结构调整技术,提高西北旱作区光热资源利用效率,增产增效显著

目前西北半干旱区根据当地光热资源充沛,水资源短缺的区域特性,对作物布局、种植目标、作物品种等进行调整,以突出区域优势,凸显区域特色,保障旱作农业增产增效。首先针对甘肃省光热资源充沛、干旱、早晚温差大等气候特点,加大马铃薯种植面积,减少小麦种植面积;随全膜双垄沟播技术的推广,增加玉米种植面积;二是种植目标调整,变增总量的单一目标为提质、增效、增收、保护环境和资源的复合目标。科技先行、品种为先,近年来,甘肃省育种和品种引进工作成效显著,新大坪、渭薯系列、陇薯系列不断

出新,马铃薯平均每667 m²产达2 300 kg以上,产量较1998年的每667 m²840 kg提高173.8%,淀粉含量提高110%左右,蛋白质含量提高190%左右,Vc含量提高50%左右,马铃薯品质显著提升;通过免耕+小麦/马铃薯合理轮作技术的推广,节约成本,增收增效;三是技术调整。在推广全膜双垄沟播技术、全膜覆土穴播技术等增产技术、常规技术、单项技术的同时,大力推广机播机收、保护性耕作等增值、降耗、节地、节物、节能、节劳技术,通过推广全膜双垄沟播玉米-玉米/马铃薯-玉米/马铃薯/冬油菜/胡麻免耕一膜多年用技术,结合播前机械起垄铺膜,每667 m²节约成本215~430元;推广膜上覆土穴播小麦-小麦/冬油菜/胡麻-马铃薯/大豆一膜三年用技术,每667 m²节约成本260~520元,节本增效效果显著。集成推广马铃薯全膜双垄沟播和膜侧沟播模式,马铃薯产量增加13.6%~64.5%,同时结合早熟品种,早铺膜、早种植,达到马铃薯早上市的目的,平均每公斤价格提高3~4元,增产增收效果显著。通过推广马铃薯与豆类间套作技术,充分利用光热水土资源,单位面积作物生产力提高11.3%~24.0%,保障西北半干旱区农业生产可持续发展。

3 气候变化下西北旱作农业发展措施展望

未来气候变化对西北旱作农业的影响主要有3方面:一是气温升高导致作物产量降低,品质下降;二是降水量和降水格局变化引发的作物干旱/洪涝问题;三是极端气候引发的气象灾害导致粮食生产波动。因此,未来西北旱作农业发展的总体方向是解决或缓解上述不良影响,通过旱作农业措施的改变与调整来应对未来全球气候变化。

3.1 提高土壤保蓄水分能力,以“调水”应对降水变化

气候变化的一个明显特征是降水量和季节分配发生的显著变化,可能导致自然降水和作物需水不匹配,季节性干旱频发,严重制约农田生产力的持续提高。提高土壤的蓄保水能力,实现自然降水的周年调配利用,是应对未来气候变化的主要方向。覆盖技术不但能够有效抑制土面蒸发,而且可以改变水分在不同土层土壤中的分配,并具有调控土壤水分运移特征的作用;另外,覆盖技术配合垄沟种植技术,还具有明显提高聚集自然降水的功能,提高降水入渗效率;再次,覆盖技术的应用,能够显著降低土壤侵蚀,达到保水保土的目的。目前,在西北旱作农区大面积应用的砂石覆盖、地膜覆盖和秸秆覆盖技术,显著改善了农

田土壤水分条件,实现了对自然降水的周年调控,达到了稳定提高农田生产力的目的。覆盖技术也存在较为突出的问题,如残膜污染、高产种植的土壤水生态安全、耕地质量下降、病虫害草害问题等。干旱农业发展必须要立足于覆盖种植这一关键技术措施。通过材料科学的发展、农作制度优化设计、有机物还田和生物综合防控技术应用,来解决当前覆盖农业面临的关键技术问题,以有效应对气候变化对干旱农业产生的不利影响,实现农田生产力的稳步提高。

3.2 “改土”增强作物-土壤体系的环境适应能力,缓解气候变化的不利影响

气候变化可能会导致全球气温进一步升高,极端气候频度与强度进一步加强,暖干化、极端低温、极端高温、极端干旱/降雨频发,加大旱作农田生产波动性与不稳定性。减缓土壤对外界条件变化的响应,提高作物-土壤体系对环境变化的适应能力以减小农业生产波动性与不稳定性,是应对气候变化的重要方向。土壤培肥技术不仅能够提升地力、提高作物水肥利用效率以构建合理群体,而且能够优化土壤结构、改良土壤理化性质;通过作物合理群体的建立和土壤水、气、热特性的改良提高作物-土壤体系对环境变化的适应能力以应对未来气候变化,稳定旱作农业生产力。目前,在西北旱作农区大面积应用的测土配方施肥技术、免耕技术、机械深松土壤水库扩容技术和秸秆还田技术显著提高了旱作农田地力水平,提高作物水分利用效率,优化了土壤结构,达到了增强作物-土壤体系对环境变化的适应能力的目的。但单项技术效果仍显不够,技术集成仍需进一步发展,另外,土壤培肥是一个缓慢的过程,需长期应用“改土”技术,逐步提升地力、发挥“改土”功效、稳定粮食生产。

3.3 “水土协调”综合应对未来气候变化

复杂的、综合的气候变化对农业生产的影响可能也远不止气温升高、降水变化和极端气候。综合应对气候变化,除气象因子外,协调“水、土、肥”是应对未来气候变化的途径。目前西北旱作区广泛应用的免耕型全膜双垄沟播技术,测土配方施肥技术、免耕技术、机械深松土壤水库扩容技术和秸秆还田技术以及单项技术集成,通过全地面地膜覆盖抑蒸保水,防风蚀水蚀,减缓干旱和暴雨暴风洪涝的影响。通过调控土壤水分供给、作物耗水特性缓解干旱胁迫,通过调节土壤导热性、稳定地温缓解高温胁迫,通过免耕增加土壤有机质,稳定并逐步提升地力,从而提高作物水肥利用效率,增强作物-土壤体系对环境变化的缓冲能

力,减弱作物-土壤体系对环境变化的响应,综合提高作物-土壤体系抵御环境变化的能力以应对气候变化。

4 结论

综上所述,未来气候变化对西北半干旱区作物生长的影响主要有 3 方面:一是气温升高导致作物产量降低,品质下降;二是降水量和降水格局变化引发的作物干旱/洪涝问题;三是极端气候引发的气象灾害导致粮食生产波动。因此,目前的旱作农业研究实践都必须以适应或缓解上述不利影响为主,以提高有限降水利用效率、优化土壤结构、提升土壤肥力和增强作物-土壤体系抵御环境变化能力为核心目标深入研究:(1)覆盖聚集降水,提高土壤蓄水保墒能力,改变土壤水分分配,调控土壤水分运移并提高降水入渗效率,从而“调水”以适应降水变化;(2)土壤培肥优化土壤结构、改良土壤理化性质,从而“改土”提高作物-土壤体系对环境变化的适应能力以应对未来气候变化,稳定旱作农业生产力;(3)通过“调水”和“改土”技术集成,形成“水土协调”技术体系以综合应对未来气候变化,减缓未来气候变化对西北半干旱区粮食生产的不利影响。

参考文献:

- [1] Prentice I C, Farquhar G D, Fasham M J R, et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide[C]/IPCC. Contributions of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 183-238.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: The scientific basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002. QIN Da-he. A study of environment change and its impacts in western China[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese)
- [4] 沈振荣, 苏人琼. 中国农业水危机对策研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 1-15. SHEN Zhen-rong, SU Ren-qiong. Countermeasure of agricultural water crisis in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1998: 1-15.(in Chinese)
- [5] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56. LIN Er-da, XU Yin-long, JIANG Jin-he, et al. China's national assessment report on climate change (II): climate change and adaptation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(2): 51-56.(in Chinese)
- [6] 林而达, 吴绍洪, 戴晓苏, 等. 气候变化影响的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 125-131. LIN Er-da, WU Shao-hong, DAI Xiao-su, et al. Updated understanding of climate change impacts[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 125-131.(in Chinese)
- [7] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18. ZHAI Pan-mao, ZOU Xu-kai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 16-18.(in Chinese)
- [8] 刘德祥, 董安祥, 陆登荣. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 195-201. LIU De-xiang, DONG An-xiang, LU Deng-rong. Climatic change of northwest China and its influence on agricultural production in recent 43 years[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 195-201.(in Chinese)
- [9] 刘德祥, 白虎志, 宁慧芳, 等. 气候变暖对甘肃干旱气象灾害的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 707-711. LIU De-xiang, BAI Hu-zhi, NING Hui-fang, et al. Response of arid meteorological disaster to climatic warming in Gansu Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 707-711.(in Chinese)
- [10] 谢立勇, 林而达. 二氧化碳浓度增高对稻、麦品质影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 659-664. XIE Li-yong, LIN Er-da. Research advances in the effects of elevated CO₂ on rice and wheat quality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 659-664.(in Chinese)
- [11] 杨连新, 王余龙, 黄建晔, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1331-1337. YANG Lian-xin, WANG Yu-long, HUANG Jian-ye, et al. Research advances in the impact of free-air CO₂ enrichment on the growth of rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1331-1337.(in Chinese)
- [12] 尹宪志, 邓振镛, 徐启运, 等. 甘肃省近 50 a 干旱灾情研究[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 120-124. YIN Xian-zhi, DENG Zhen-yong, XU Qi-yun, et al. Study on drought disasters in Gansu Province since recent 50 years[J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22(1): 120-124.(in Chinese)
- [13] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估 I: 中国气候与环境变化及未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9. QIN Da-he, DING Yi-hui, SU Ji-lan, et al. Assessment of climate and environment changes in China I: Climate and environment changes in China and their projection[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 4-9.(in Chinese)
- [14] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 905-910. LIU Yan-sui, LIU Yu, GUO Li-ying. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 905-910.(in Chinese)
- [15] 周京平, 王卫丹. 极端气候因素对中国农业经济影响初探[J]. 现代经济, 2009, 8(7): 142-145. ZHOU Jing-ping, WANG Wei-dan. Impact of extreme climatic factors on China's agricultural economy[J]. *Modern Economics*, 2009, 8(7): 142-145.(in Chinese)
- [16] 中国气象局国家气候中心. 全国气候影响评价(2007)[M]. 北京: 气象出版社, 2008.

- National Climate Center, China Meteorological Administration Bureau. China climate impact assessment (2007)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.(in Chinese)
- [17] 魏娜, 田武文. 2013年陕西气候影响评价[J]. 陕西气象, 2014(3): 29-32.
WEI Na, TIAN Wu-wen. Climate impact assessment in Shannxi in 2013[J]. *Journal of Shannxi Meteorology*, 2014(3): 29-32.(in Chinese)
- [18] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 1996—2009年甘肃省极端气温的变化[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 674-680.
WANG Bao-long, ZHANG Ming-jun, WEI Jun-lin, et al. Study on change of extreme temperatures in Gansu Province during the period of 1960—2009[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4): 674-680.(in Chinese)
- [19] 甘肃农村年鉴编委会. 甘肃农村 2013 年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013: 289-290.
Gansu Rural Year Book Editorial Committee. Gansu rural year book in 2013[M]. Beijing: China Statistic Press, 2013: 289-290.(in Chinese)
- [20] 逢蕾, 肖洪浪, 陆建龙, 等. 干旱半干旱地区砂田结构及水分特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 698-704.
PANG Lei, XIAO Hong-lang, LU Jian-long, et al. Soil profile structure and moisture character of gravel-sand mulched field in arid and semi-arid area of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(3): 698-704.(in Chinese)
- [21] 谷博轩, 梁鹏锋, 彭红涛, 等. 砂田降雨入渗过程的模拟实验研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(32): 281-286.
GU Bo-xuan, LIANG Peng-feng, PENG Hong-tao, et al. Rainfall simulation experimental study on infiltrability of soil under sand and gravel mulch[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(32): 281-286.(in Chinese)
- [22] 刘东海, 周玉平, 赵国杰. 宁夏黄土丘陵区旱作农田蓄水保墒耕作技术经验总结[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 33-38.
LIU Dong-hai, ZHOU Yu-ping, ZHAO Guo-jie. A summary of moisture retention technique in loessial hilly rainfed farming areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 33-38.(in Chinese)
- [23] 高绪科, 王小彬, 汪德水, 等. 旱地麦田蓄水保墒耕作措施的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1991(4): 1-9.
GAO Xu-ke, WANG Xiao-bin, WANG De-shui, et al. A study on tillage measure for soil water storage and conservation in rainfed wheat fields[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1991(4): 1-9.(in Chinese)
- [24] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1295-1302.
MA Zhong-ming, DU Shao-ping, XUE Liang. Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1295-1302.(in Chinese)
- [25] 傅亲民, 王彩斌, 刘生学. 旱砂田宽膜覆盖籽瓜栽培技术土壤水温度效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 97-114.
FU Qin-min, WANG Cai-bin, LIU Sheng-xue. Study on effects of technique of wide plastic-film mulching on soil water and soil temperature for seed-melon on dryland covered with sand[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(6): 97-114.(in Chinese)
- [26] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 覆砂年限对砂田砂层质量、土壤水热状况及西瓜生长的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1433-1439.
MA Zhong-ming, DU Shao-ping, XUE Liang. Influences of sand-mulching years on soil temperature, water content, and growth and water use efficiency of watermelon[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1433-1439.(in Chinese)
- [27] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2609-2614.
WANG Hong-li, ZHANG Xu-cheng, SONG Shang-you, et al. Effects of whole field surface plastic mulching and planting in furrow on soil temperature, soil moisture, and corn yield in arid area of Gansu Province, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2609-2614.(in Chinese)
- [28] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 71-83.
- [29] Zhang J Y, Sun J S, Duan A W, et al. Effects of different planting patterns on water use and yield performance of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 92(1-2): 41-47.
- [30] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [31] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 917-926.
WANG Hong-li, ZHANG Xu-cheng, SONG Shang-you, et al. Regulation of whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting on seasonal soil water loss and maize yield in rain-fed area of northwest Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5): 917-926.(in Chinese)
- [32] Li F M, Wang J, Li S Q, et al. Productivity and soil responses to plastic film mulching duration on spring wheat cropland in semiarid area[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 78(1): 9-20.
- [33] Carter D C, Miller S. Three years' experience with an on-farm macro-catchment water harvesting system in Botswana[J]. *Agricultural Water Management*, 1991, 19(3): 191-203.
- [34] Li X Y, Gong J D, Wei X H. In-situ rainwater harvesting and gravel mulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 46(4): 371-382.
- [35] 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等. 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5580-5588.
WANG Hong-li, SONG Shang-you, ZHANG Xu-cheng, et al. Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semiarid area in drylands of Gansu, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5580-5588.(in Chinese)
- [36] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 农田秸秆覆盖对冬小麦水氮效应的影

- 响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1450-1454.
- GAO Ya-jun, LI Sheng-xiu, LI Shi-qing, et al. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on winter wheat yield under straw mulch[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1450-1454.(in Chinese)
- [37] Watson G W. Organic mulch and grass competition influence tree root development[J]. *Journal of Arboriculture*, 1988, 14(8): 200-203.
- [38] Greenly K M, Rakow D A. The effect of wood mulch type and depth on weed and tree growth and certain soil parameters[J]. *Journal of Arboriculture*, 1995, 21(5): 225-232.
- [39] 梁 伟. 农田秸秆覆盖的作用及发展前景[J]. 甘肃农业科技, 1992(11): 20-21.
- LIANG Wei. Role and prospects of straw coverage technology in farmlands[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 1992(11): 20-21.(in Chinese)
- [40] 黄高宝, 李玲玲, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 1-5.
- HUANG Gao-bao, LI Ling-ling, ZHANG Ren-zhi, et al. Effects of no-tillage with stubble retention on soil temperature of rainfed spring wheat field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5): 1-5.(in Chinese)
- [41] 刘立晶, 高焕文, 李洪文. 秸秆覆盖对降雨入渗影响的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(5): 12-15.
- LIU Li-jing, GAO Huan-wen, LI Hong-wen. Experimental study on effect of mulch cover on rainwater infiltration[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(5): 12-15.(in Chinese)
- [42] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 539-542.
- WU Zhi-jie, ZHANG Hai-jun, XU Guang-shan, et al. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 539-542.(in Chinese)
- [43] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48-51.
- LIU Shi-ping, NIE Xin-tao, ZHANG Hong-cheng, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 48-51.(in Chinese)
- [44] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 等. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较[J]. 中国农业科学, 2006, 39(5): 1069-1075.
- BU Yu-shan, MIAO Guo-yuan, ZHOU Nai-jian, et al. Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 1069-1075.(in Chinese)
- [45] 任万军, 刘代银, 吴锦秀, 等. 免耕高留茬抛秧对稻田土壤肥力和微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 817-822.
- REN Wan-jun, LIU Dai-yin, WU Jin-xiu, et al. Effects of returning straw to soil and different tillage methods on paddy field soil fertility and microbial population[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 817-822.(in Chinese)
- [46] 王长生, 王遵义, 苏成贵, 等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 167-169.
- WANG Chang-sheng, WANG Zun-yi, SU Cheng-gui, et al. Development and application of protective farming technique[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2004, 35(1): 167-169.(in Chinese)
- [47] 徐阳春, 沈其荣, 冉 炜, 等. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.
- XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, RAN Wei, et al. Effects of no-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89-96.(in Chinese)
- [48] 王 虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491-3498.
- WANG Hu, WANG Xu-dong, TIAN Xiao-hong. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3491-3498.(in Chinese)
- [49] 蔡太义, 黄会娟, 黄耀威, 等. 不同量秸秆覆盖还田对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 964-973.
- CAI Tai-yi, HUANG Hui-juan, HUANG Yao-wei, et al. Effect of different rates of straw mulching and returning to field on soil labile organic carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 964-973.(in Chinese)