

春小麦—向日葵复种对土壤水盐及农田生产力的影响

白岗栓^{1,2}, 邹超煜¹, 杜社妮^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为充分利用自然资源, 减轻土壤盐渍化, 提高农田生产力, 在内蒙古河套灌区以春小麦、玉米和向日葵单作为对照, 监测春小麦—向日葵复种对土壤水分、盐分和农田生产力的影响。结果表明: 春小麦收获前, 春小麦—向日葵复种和春小麦单作 0—100 cm 土层土壤水分低于玉米单作和向日葵单作; 春小麦收获后春小麦—向日葵复种、玉米单作和向日葵单作耕层土壤水分高于春小麦单作, 20—80 cm 土层土壤水分则低于春小麦单作。春小麦收获前不同种植模式的土壤盐分变化剧烈, 春小麦收获后则变化平缓。不同种植模式主要影响 0—40 cm 土层土壤盐分, 对 40 cm 土层以下的土壤盐分影响较小。复种向日葵收获期春小麦—向日葵复种耕层土壤盐分较春小麦单作、玉米单作和向日葵单作分别降低 32.52%, 16.70% 和 24.92%, 0—100 cm 土层分别降低 13.32%, 8.88% 和 12.07%。春小麦—向日葵复种的等价产量较春小麦单作、玉米单作和向日葵单作分别高出 126.01%, 3.86% 和 3.21%。春小麦—向日葵复种可减少土壤盐分, 提高农田生产力, 在河套灌区具有一定的发展前景。

关键词: 春小麦; 向日葵; 复种; 土壤水分; 土壤盐分; 生产力

中图分类号: S344.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0227-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2017.04.036

Effects of Spring Wheat-sunflower Multiple Cropping on Soil Moisture, Soil Salinity and Farmland Productivity in Hetao Irrigation District

BAI Gangshuan^{1,2}, ZOU Chaoyu¹, DU Shen^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to make full use of natural resources, reduce soil salinization and improve farmland productivity, this experiment took spring wheat sole cropping, maize sole cropping and sunflower sole cropping as control, the effects of spring wheat-sunflower multiple cropping on soil moisture, soil salinity and farmland productivity were investigated in Hetao irrigation district. The results showed that before spring wheat harvest, the soil moisture in 0—100 cm soil layer of spring wheat-sunflower multiple cropping and spring wheat sole cropping were lower than maize sole cropping and sunflower sole cropping. After spring wheat harvest, soil moisture in top layer of spring wheat-sunflower multiple cropping, maize sole cropping and sunflower sole cropping were higher than spring wheat sole cropping, but soil moisture in 20—80 cm soil layer were lower. Soil salinity of different cropping patterns changed drastically before spring wheat harvest, but changed gently after spring wheat harvest. Different cropping patterns had great influence on soil salinity in 0—40 cm soil layer, but had less influence on soil salinity under 40 cm soil layer. When multiple cropping sunflower harvest, top soil salinity of spring wheat-sunflower multiple cropping were lower than that of spring wheat sole cropping, maize sole cropping and sunflower sole cropping, by 32.52%, 16.70% and 24.92% respectively, and 0—100 cm soil layer soil salinity were lower by 13.32%, 8.88% and 12.07% respectively. Equivalent yields of spring wheat-sunflower multiple cropping were 126.01%, 3.86% and 3.21% respectively, higher than that of spring wheat sole cropping, maize sole cropping and sunflower sole cropping. Spring wheat-sunflower multiple cropping could reduce soil salinity, improve farmland productivity, and have a certain development prospect in Hetao irrigation district.

收稿日期: 2017-02-28

资助项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAD14B006)

第一作者: 白岗栓(1965—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事农田生态及果树栽培研究。E-mail: gshb@nwsuaf.edu.cn

Keywords: spring wheat; sunflower; multiple cropping; soil moisture; soil salinity; productivity

复种是粮食增产最简单、最直接、最有效的方式之一,在农业生产中具有重要的作用^[1-2]。内蒙古河套灌区为传统的一年一熟种植区,是中国最大的自流灌区和北方优质高筋春小麦生产基地^[3]。河套灌区地处干旱荒漠区,降水稀少,土壤盐渍化严重威胁当地农业生产及生态环境持续和健康发展^[4-6]。河套灌区春小麦收获后耕地闲置期长达 80 d 左右无植被覆盖,不但浪费光、热等资源,而且易形成土壤盐分表聚,加重土壤盐渍化^[7-8]。向日葵为耐盐作物,可吸收利用土壤中的部分盐分^[9],春小麦收获前 25 d 左右进行向日葵育苗,春小麦收获后及时移栽向日葵,复种的向日葵在早霜来临之前能正常成熟^[1-2],这不但将该区传统的一年一熟改为一年两熟,提高光热资源和土壤水肥利用效率^[10-11],而且可减轻土壤盐渍化,促进河套灌区农业及生态环境的持续和健康发展^[12-14]。近年来有关土壤盐渍化治理的措施较多,如水利工程、农业措施、生物措施和化学措施等^[15-20],春小麦复种向日葵,是农业措施与生物措施相结合的治理盐渍化的有效方法,但有关春小麦一向向日葵复种降低土壤盐分和提高农田生产力缺乏研究。2013—2015 年以河套灌区传统种植模式春小麦、向日葵、玉米单作为对照,探讨春小麦一向向日葵复种对土壤水分、土壤盐分及农田生产力的影响,为河套灌区春小麦一向向日葵复种提供依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验地自然条件

试验地位于河套灌区西部的磴口县坝楞村,东经 107°02'19",北纬 40°24'32",海拔 1 048.6 m,年降水量 142.1 mm,水面蒸发量 2 346.4 mm;年均气温 7.1℃,干燥度 16.51,日照时数 3 187.3 h,无霜期 178 d,年均风速 2.57 m/s。试验地土壤为灌淤土,土层 1.5—1.8 m,地下水位 3.0 m 以下。耕层土壤有机质含量 9.80 g/kg,速效氮含量 63.24 mg/kg,速效磷含量 12.6 mg/kg,速效钾含量 171.4 mg/kg,pH 8.8,含盐量 0.20%。试验地灌溉水为过境黄河水,pH 8.1,矿化度 0.320 g/L。

1.2 试验设计

试验以春小麦、向日葵和玉米单作为对照,分析、比较春小麦一向向日葵复种对土壤水分、盐分和农田生产力的影响。试验小区为 5.0 m×20.0 m,重复 3 次,共 12 个小区。2013—2015 年每年的供试茬口均为玉米茬,且土壤肥力基本一致。每年秋末冬初“秋浇”前不同小区之间埋深 120 cm,厚 1.5 mm 的 HDPE 防渗膜,以防不同小区土壤水分侧渗;每年播

种前不同小区之间修高 25 cm,宽 30 cm 的土壤,防止灌溉水串流。

1.3 农艺措施

供试春小麦品种为永良 4 号,每年 3 月 25 日左右进行播种和施种肥,其中播种量 375.0 kg/hm²,种肥 N 172.5 kg/hm²,P₂O₅ 67.5 kg/hm²,K₂O 21.5 kg/hm²(磷酸二铵 375.0 kg/hm²,氯化钾 37.5 kg/hm²),行距 11.0 cm。分蘖期、拔节期、孕穗期和灌浆期各灌水 1 次,孕穗期随灌水追施 N 69.0 kg/hm²(尿素 150.0 kg/hm²)。春小麦收获后当日翻耕,其中春小麦一向向日葵复种翻耕当日移栽向日葵,春小麦单作翻耕后则进入休闲期。

供试玉米品种为科河 28,每年 4 月 25 日左右进行播种和施种肥,其中播种量 30.0 kg/hm²,种肥 N 193.0 kg/hm²,P₂O₅ 67.5 kg/hm²,K₂O 68.5 kg/hm²(磷酸二铵 375.0 kg/hm²,硝酸钾 150.0 kg/hm²),宽行距 80.0 cm,窄行距 40.0 cm,株距 28.0 cm。拔节期、喇叭口期、抽雄吐丝期和灌浆期各灌水 1 次;喇叭口期和抽雄吐丝期随灌水各追施 N 69 kg/hm²(尿素 150.0 kg/hm²)。

向日葵单作供试品种为先瑞 9 号,5 月 25 日进行播种和施种肥,其中播种量 11.25 kg/hm²,种肥 N 172.5 kg/hm²,P₂O₅ 67.5 kg/hm²,K₂O 21.5 kg/hm²(磷酸二铵 375.0 kg/hm²,氯化钾 37.5 kg/hm²),宽行距 90 cm,窄行距 40 cm,株距 40 cm。现蕾期和开花期各灌水 1 次。现蕾期随灌水追施 N 103.5 kg/hm²(尿素 225.0 kg/hm²)。

复种向日葵品种为 KD204(新食葵 2 号),6 月 20 日左右温室育苗,春小麦收获后当日移栽。宽行距 70 cm,窄行距 40 cm,株距 40 cm(移栽向日葵植株矮小,栽植密度高于直播向日葵)。移栽时灌缓苗水 60 mm,现蕾期和开花期各灌水 1 次,现蕾期随灌溉追施 N 103.5 kg/hm²(尿素 225.0 kg/hm²)。移栽时株高 22.0~24.0 cm 左右,茎粗 0.36~0.38 cm 左右,具有 6~8 片真叶。

1.4 测定项目

降水量。试验地设有农田小气候观测仪,测定不同作物生长期(从播种或移栽到收获期之间的持续期)和整个生长季(春季日平均气温稳定通过 3℃时到秋季日平均气温下降到 3℃以下时之间的持续期,试验地为 3 月 25 日至 10 月 10 日)的降水量。

灌水量。记录不同种植模式每次的灌溉日期及灌水量。灌水量根据试验设计,通过抽水持续时段和水表读数进行控制和测定,并将灌水量折算为灌水厚度。

土壤水分。在不同作物播种或移栽前、灌溉前和收获后,并在每种作物旺盛生长期,在窄行行中部(春小麦为行中部)以 10 cm 土层为一层,用土钻分层采取 0—100 cm 土层土壤,烘干法测定不同种植模式的土壤含水率,并根据土层厚度和土壤容重换算成土壤水层厚度^[21-22]。

土壤盐分。在不同作物播种或定植前、灌溉前和收获后,并在每种作物旺盛生长期,以 10 cm 土层为一层,在窄行行中部用土钻分层采取 0—100 cm 土层土壤,风干后过 1 mm 筛,土水比 1:5 测定土壤浸提液在 25 °C 时的电导率(EC mS/cm),并换算出土壤水溶性全盐质量分数^[21-22]。

作物产量及生物量。记录每一种作物种植或移栽、收获的时间。春小麦收获期以 1.0 m² 为单位,棋盘法取样,常规方法测定单作、复种春小麦地上部生物量及产量。玉米成熟期和单作、复种向日葵成熟期,每个小区随机抽取 15 株玉米或向日葵,常规方法测定玉米和单作、复种向日葵的生物量及产量。

等价产量。不同作物籽粒和秸秆的营养物质不同,故以不同作物的等价产量来比较不同种植模式的作物产量^[23]。春小麦—向日葵复种等价产量为复种春小麦与复种向日葵的等价产量之和。

$$Y_e = DM_1 \times E_1 + DM_2 \times E_2 \quad (1)$$

式中: Y_e 为等价产量(kg/hm²); DM_1 为籽粒生物量(kg/hm²); DM_2 为秸秆生物量(kg/hm²); E_1 和 E_2 分别为籽粒和秸秆收获体的等价系数。

等价系数 = 收获体蛋白质含量/0.38 + 收获体脂类含量/0.31 + 收获体淀粉含量/0.84

(2)

式中:0.38, 0.31 和 0.84 分别为 3 种光合产物的能量转换率^[23]。

不同作物秸秆、籽粒中的蛋白质含量采用凯氏定氮法测定;脂肪含量采用索氏抽提法测定;淀粉含量采用酶水解法测定^[24-25]。

1.5 计算各种种植模式的耗水量和等价水分利用效率

耗水量。试验地土层较厚,地下水位较深,田面平整,土壤质地均一,无水分的水平运动,地下水补给量和渗漏量较小可忽略不计。土壤水分主要来源于降水和灌溉。

$$ET = p + I - \Delta h \quad (3)$$

式中: ET 为田间耗水量(mm); p 为不同种植模式生长期或生长季的有效降水量(mm); I 为不同种植模式生长期或生长季的灌水量(mm); Δh 为不同种植模式生长期或生长季的土壤水分变化值(mm)。有效降水量根据经验公式来计算^[21-22]。

$$p = \lambda \times p' \quad (4)$$

式中: λ 为降水有效利用系数; p' 为不同种植模式作物生长期或生长季的实际降水量(mm)。当 24 h 降水量或一次降水量 ≤ 5 mm, λ 为 0;当降水量处于 5~50 mm 时, λ 为 1.00^[21-22]。

等价水分利用效率和等价水分生产率。

$$EWUE = EB/ET \quad (5)$$

$$EWPR = EY/ET \quad (6)$$

式中: $EWUE$ 为等价水分利用率(kg/(mm·hm²)); EB 为不同种植模式的等价产量(kg/hm²); $EWPR$ 为不同种植模式的等价水分生产率(kg/(mm·hm²)); EY 为不同种植模式的等价籽粒产量(kg/hm²)。

1.6 数据处理

试验连续进行了 3 年,不同年份的降水量、降水时期不同,不同年份的土壤水分、土壤盐分及作物产量等也有所不同,但不同种植模式 3 年期间土壤水分、土壤盐分及作物产量等的变化规律相同。为了简化数据处理,便于统计分析,本文以 2015 年试验结果为基础,分析讨论不同种植模式对土壤水盐及农田生产力的影响。试验数据采用 Excel 2010 制作图表,SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析;采用 Duncan's 多重比较进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 试验期降水量及不同种植模式的灌水量

2015 年的降水量及降水时期与往年基本一致,其中单作春小麦生长期自然降水量为 56.5 mm,单作向日葵和单作玉米分别为 72.4 mm 和 96.3 mm,春小麦—向日葵复种为 113.8 mm(表 1)。

不同种植模式中,向日葵单作灌溉 2 次,灌水总量为 180 mm;春小麦单作和玉米单作均灌溉 4 次,灌水总量均为 360 mm;春小麦—向日葵复种灌溉 7 次,灌水总量达 600 mm(表 1)。

表 1 不同种植模式的灌溉状况及降水量

种植 模式	灌溉时间(月-日)								灌溉状况		降水量/mm			
	5-05	5-25	6-20	7-05	7-15	8-05	8-25	次数	灌水量/mm	生长期		生长季		
							自然降水量			有效降水量	自然降水量	有效降水量		
春小麦单作	√	√	√	√	×	×	×	4	360	56.5	51.2	113.8	98.8	
玉米单作	×	×	√	√	×	√	√	4	360	96.3	84.6	113.8	98.8	
向日葵单作	×	×	×	√	×	√	×	2	180	72.4	66.3	113.8	98.8	
春小麦—向日葵复种	√	√	√	√	√	√	√	7	600	113.8	98.8	113.8	98.8	

注:√表示该种植模式进行了灌溉;×表示该种植模式未进行灌溉;7-15 灌水量为 60 mm;其他次灌水量均为 90 mm。

2.2 不同种植模式对土壤水分的影响

不同种植模式的土壤水分随灌溉次数、灌溉时期及种植模式而变化,由浅层到深层,土壤水分受灌溉及种植模式的影响程度逐渐降低,不同土层之间的差异逐渐缩小(图 1)。

春小麦成熟前,春小麦一向日葵复种与春小麦单作耕层(0—20 cm 土层)土壤水分无显著差异。春小麦收获后,春小麦一向日葵复种耕层土壤水分较玉米单作、向日葵单作变化频繁,而春小麦单作土壤水分含量较低且处于相对稳定状态。春小麦成熟期(7 月 15 日),春小麦一向日葵复种耕层土壤水分与春小麦单作相同,但极显著低于玉米单作和向日葵单作。单作玉米和单作向日葵成熟期(9 月 25 日),春小麦一向日葵复种耕层土壤水分与玉米单作、向日葵单作无显著差异,但极显著高于春小麦单作。复种向日葵成熟期(10 月 10 日),春小麦一向日葵复种耕层土壤水分极显著高于春小麦单作,极显著低于玉米单作和向日葵单作(图 1a)。

不同种植模式 20—40 cm 土层的土壤水分在玉米灌浆期和单作向日葵灌浆期(8 月 25 日)前变化趋势与耕层土壤相似(图 1b)。春小麦成熟期,春小麦一向日葵复种和春小麦单作极显著低于玉米单作与向日葵单作。生长季后期春小麦单作无作物蒸腾消耗;单作向日葵灌浆期未进行灌溉,因而单作玉米和单作向日葵成熟期及复种向日葵成熟期,20—40 cm 土层土壤水分表现为春小麦单作>玉米单作>春小麦一向日葵复种>向日葵单作,不同种植模式间存在极显著差异。

春小麦从抽穗到灌浆期耗水量大,土壤水分消耗较多,因而春小麦一向日葵复种和春小麦单作 40—60 cm 土层土壤水分在春小麦成熟期出现最低值(图 1c)。春小麦成熟期春小麦一向日葵复种和春小麦单作 40—60 cm 土层土壤水分极显著低于玉米单作,玉米单作又极显著低于向日葵单作。单作玉米和单作向日葵成熟期及复种向日葵成熟期,春小麦一向日葵复种和玉米单作、向日葵单作之间的土壤水分无显著差异,但春小麦一向日葵复种和向日葵单作极显著低于春小麦单作,玉米单作显著低于春小麦单作。

春小麦成熟期,春小麦一向日葵复种和春小麦单作 60—80 cm 土层土壤水分极显著低于玉米单作,玉米单作显著低于向日葵单作(图 1d)。单作玉米和单作向日葵成熟期及复种向日葵成熟期,春小麦一向日葵复种、玉米单作和向日葵单作之间无显著差异,三者均极显著低于春小麦单作。

春小麦成熟期春小麦一向日葵复种和春小麦单作 80—100 cm 土层土壤水分极显著低于向日葵单作

与玉米单作(图 1e)。单作玉米和单作向日葵成熟期及复种向日葵成熟期不同种植模式之间的土壤水分无显著差异。

春小麦成熟期 0—100 cm 土层土壤水分分为春小麦一向日葵复种和春小麦单作极显著低于玉米单作,玉米单作显著低于向日葵单作(图 1f)。单作玉米和单作向日葵成熟期,春小麦一向日葵复种与玉米单作及向日葵单作之间无显著差异,且春小麦一向日葵复种和向日葵单作显著低于春小麦单作。复种向日葵成熟期,春小麦一向日葵复种和向日葵单作之间无显著差异,二者显著低于春小麦单作和玉米单作。

2.3 不同种植模式对土壤盐分的影响

土壤盐分与土壤水分蒸发密切相关。春小麦成熟前河套灌区干燥多风且降水量小,气温处于上升阶段,不同种植模式的作物覆盖度较低,灌溉次数少,土壤水分蒸散以地表蒸发为主,因而不同种植模式不同土层土壤盐分变化剧烈,且土层越浅,变化越强烈(图 2)。春小麦收获后除春小麦单作外,作物覆盖度高,蒸腾强度大且降水量较多,灌溉次数多,空气湿润,因而土壤盐分变化平缓,上层土壤积盐较少,基本稳定在一定水平。不同种植模式中,耕层土壤盐分变化剧烈,20—40 cm 土层处于较低状态,40—60 cm 处于过度带,60—80 cm 土层和 80—100 cm 土层始终处于较高状态,这主要与当地的成土环境和土壤水盐运移等有关^[4,12]。

春小麦成熟前,不同种植模式耕层土壤盐分峰值表现为向日葵单作>玉米单作>春小麦单作≈春小麦一向日葵复种(图 2a),春小麦一向日葵复种和春小麦单作极显著低于玉米单作,玉米单作显著低于向日葵单作。春小麦收获期春小麦一向日葵复种和春小麦单作、玉米单作、向日葵单作耕层土壤盐分含量分别为 1.06, 1.05, 1.12, 1.36 g/kg,春小麦一向日葵复种和春小麦单作显著低于玉米单作,玉米单作极显著低于向日葵单作。单作玉米或单作向日葵收获期和复种向日葵收获期,不同种植模式耕层土壤盐分表现为春小麦单作>向日葵单作>玉米单作>春小麦一向日葵复种,不同种植模式之间存在极显著差异。复种向日葵成熟期春小麦一向日葵复种耕层土壤盐分较春小麦单作、玉米单作和向日葵单作分别降低 32.52%, 16.70% 和 24.92%。

20—40 cm 土层土壤盐分变化趋势与 0—20 cm 土层变化相似,峰值为向日葵单作>玉米单作>春小麦单作≈春小麦一向日葵复种(图 2b),春小麦一向日葵复种和春小麦单作极显著低于向日葵单作与玉米单作。春小麦成熟期春小麦一向日葵复种、春小麦单作、玉米单作和向日葵单作 20—40 cm 土层土壤盐分含量分别为 1.00, 1.01, 1.21, 1.36 g/kg,春小

麦—向日葵复种和春小麦单作极显著低于玉米单作,玉米单作显著低于向日葵单作。单作玉米或单作向日葵成熟期和复种向日葵成熟期,不同种植模式20—40 cm 土层土壤盐分为春小麦单作>向日葵单

作>玉米单作>春小麦—向日葵复种,其中春小麦—向日葵复种极显著低于玉米单作,玉米单作显著低于向日葵单作且极显著低于春小麦单作,向日葵单作显著低于春小麦单作。

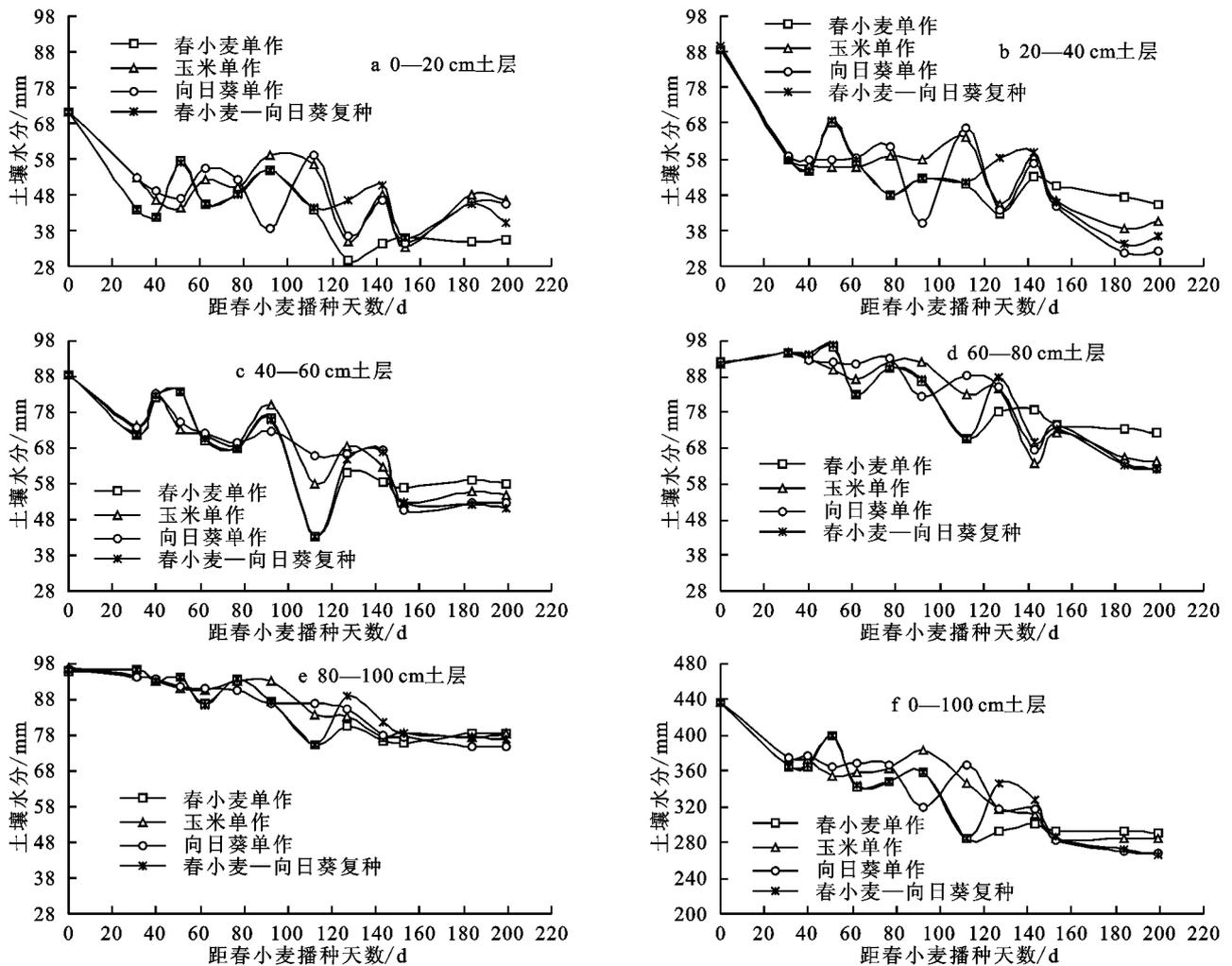


图1 不同种植方式不同土层的土壤水分变化动态

40—60,60—80,80—100 cm 土层土壤盐分在春小麦成熟前为春小麦—向日葵复种和春小麦单作低于玉米单作和向日葵单作,且40—60 cm 土层和60—80 cm 土层春小麦—向日葵复种与春小麦单作显著低于玉米单作与向日葵单作。春小麦收获后,春小麦—向日葵复种40—60 cm 土层土壤盐分显著低于春小麦单作、玉米单作和向日葵单作,60—80 cm 土层显著低于向日葵单作与玉米单作,80—100 cm 土层显著低于向日葵单作(图2c-e)。

0—100 cm 土层土壤盐分变化与0—20 cm 土层变化相似(图2f)。春小麦成熟期春小麦—向日葵复种和春小麦单作极显著低于向日葵单作,显著低于玉米单作。单作玉米或单作向日葵成熟期,春小麦—向日葵复种0—100 cm 土层土壤盐分较春小麦单作、玉米单作和向日葵单作分别降低13.52%,8.83%和11.64%,复种向日葵成熟期分别降低13.32%,8.88%和12.07%。

2.4 不同种植模式对农田生产力的影响

2.4.1 不同种植模式的等价产量 不同作物籽粒、秸秆中的蛋白质、脂肪和淀粉含量见表2。不同种植模式中,春小麦—向日葵复种的等价籽粒产量较春小麦、玉米和向日葵单作分别高出107.25%,23.20%和17.28%,等价秸秆生物量分别高出252.19%,-35.94%和-30.01%,不同种植模式之间存在显著或极显著差异(表3)。春小麦—向日葵复种的等价产量较春小麦单作、玉米和向日葵单作分别高出126.01%,3.86%和3.21%,极显著高于春小麦单作,略高于玉米单作和向日葵单作(表3)。

2.4.2 不同种植模式的等价水分利用效率 春小麦—向日葵复种生长期和生长季的等价水分利用效率和等价水分生产率均极显著低于向日葵单作和玉米单作,极显著高于春小麦单作(表4)。春小麦—向日葵复种较春小麦单作可提高土壤水分利用效率,但较玉米单作和向日葵单作则降低了土壤水分利用效率。

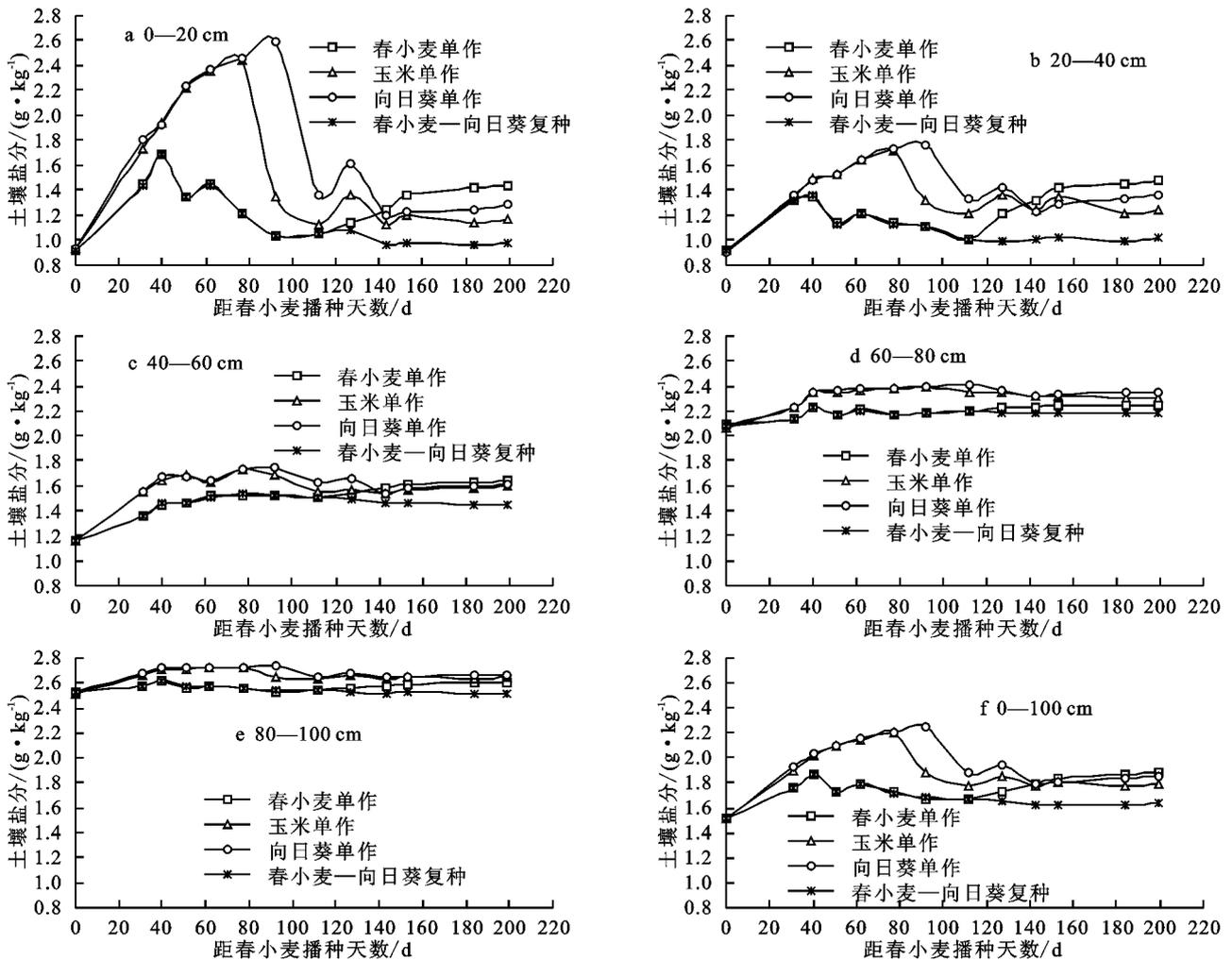


图 2 不同种植方式不同土层的土壤盐分变化动态

表 2 不同种植模式的籽粒、秸秆中的营养物质含量

作物	籽粒/%			秸秆/%		
	蛋白质	脂肪	淀粉	蛋白质	脂肪	淀粉
春小麦	11.90	1.30	75.00	3.20	2.22	1.32
玉米	8.70	3.80	66.70	7.08	3.25	11.11
向日葵	23.90	49.90	13.00	6.13	2.18	13.66

表 3 不同种植模式的籽粒产量、秸秆生物量及其等价产量

单位: kg/hm²

种植模式	籽粒产量	秸秆生物量	等价籽粒产量	等价秸秆生物量	等价产量
春小麦单作	5815.6	6291.9	7257.87cC	1079.30dC	8337.17bB
玉米单作	10654.2	14013.7	12209.71bB	5933.63aA	18143.34aA
向日葵单作	5359.6	14204.7	12825.52bB	5431.21bA	18256.73aA
春小麦—向日葵复种	5815.6w+3252.8s	6291.9w+7118.7s	15041.82aA	3801.15cB	18842.97aA

注:表中数据后的“w”表示该数据为复种春小麦的籽粒产量或秸秆生物量;“s”表示该数据为复种向日葵的籽粒产量或秸秆生物量;同列不同小写字母和大写字母表示存在显著差异($P < 0.05$)和极显著差异($P < 0.01$)。下同。

表 4 不同种植模式的等价水分利用效率和等价水分生产率

种植模式	耗水量/mm		等价水分利用效率/ (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)		等价水分生产率/ (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)	
	生长期	生长季	生长期	生长季	生长期	生长季
	春小麦单作	562.87	604.76	14.81dD	13.79dD	12.89dD
玉米单作	532.34	611.38	34.08bB	29.68bB	22.94bB	19.97bB
向日葵单作	344.84	448.84D	52.94aA	40.68aA	37.19aA	28.57aA
春小麦—向日葵复种	870.09	870.09	21.66cC	21.66cC	17.29cC	17.29cC

春小麦—向日葵复种产值较春小麦、玉米、向日葵单作分别高出 143.55%, 102.33% 和 3.19%, 净产

值分别高出 176.15%、116.55% 和 -13.26%。春小麦—向日葵复种的产值和净产值极显著高于春小麦单作和玉米单作,产值略高于向日葵单作,净产值则极显著低于向日葵单作(表 5)。

表 5 不同种植模式的经济产值

种植模式	投入/(元·hm ⁻²)			产值/(元·hm ⁻²)	净产值/(元·hm ⁻²)
	生产资料	劳动力及机械	小计		
小麦	3200cC	4500cC	7700dC	18600cC	10900dD
玉米	3300cC	5200bB	8500cB	22400bB	13900cC
向日葵	4000bB	5200bB	9200bB	43900aA	34700aA
春小麦—向日葵	6100aA	9200aA	15200aA	45300aA	30100bB

注:2013—2015 年磴口县春小麦、玉米和向日葵平均价格分别为 3.2、2.1、8.2 元/kg,春小麦、玉米和向日葵种子价格分别为 4.4、25.0、200 元/kg,尿素、磷酸二铵、硝酸钾和氯化钾价格分别为 2.1、2.7、5.0、3.5 元/kg,春小麦、玉米和向日葵播种前机械整地费均为 1 800 元/hm²,播种费为 600 元/hm²。春小麦机械收获费 600 元/hm²,玉米为 1 200 元/hm²,向日葵 15 人工/hm²。春小麦晾晒需 2 人工/hm²。玉米和向日葵脱粒及晾晒各需 2 人工/hm²,机械脱粒费 200 元/hm²。不同栽培模式每次的灌溉水费均为 150 元/hm²,除草剂费为 75 元次//hm²。春小麦、玉米和向日葵生长过程中灌溉、追肥和喷洒除草剂等管理费分别需 8 人工/hm²,12 人工/hm² 和 6 人工/hm²。向日葵防鸟需 3 人工/hm²。复种向日葵育苗和移栽需 8 人工/hm²,移栽前机械整地费 800 元/hm²,收获需 10 人工/hm²,灌溉、追肥和喷洒除草剂等管理费需 4 人工/hm²,脱粒机械费 150 元/hm²,晾晒需 1.5 人工/hm²; 一个人工折合人民币 100 元。

3 讨论与结论

3.1 讨论

河套灌区春小麦播种时土壤处于“昼融夜冻”,受上年“秋浇”的影响,土壤水分含量较高^[4-6]。春小麦播种后气温持续上升,空气干燥多风,蒸发强烈,因而不同种植模式 0—60 cm 土层土壤水分在春小麦播种后 40 d 内持续降低。春小麦分蘖期、拔节期进行了灌溉,而玉米单作、向日葵单作没有灌溉,因而玉米单作、向日葵单作此期土壤水分含量较低。春小麦孕穗到杨花期气温较高,空气干燥,春小麦—向日葵复种、春小麦单作和玉米单作进行了灌溉,而向日葵单作未进行灌溉,因而向日葵单作土壤水分含量较低。春小麦孕穗到杨花期春小麦的灌溉量与玉米相同,此期春小麦覆盖度高,蒸腾量大而玉米覆盖度低,蒸腾量小,因而春小麦—向日葵复种和春小麦单作的土壤水分低于玉米单作。春小麦灌浆期不同种植方式均进行了灌溉,但此期春小麦覆盖度高,生物量大,蒸腾量大,因而春小麦灌浆期到成熟期春小麦—向日葵复种和春小麦单作的土壤水分低于玉米单作和向日葵单作。复种向日葵移栽时灌溉了缓苗水,因而春小麦—向日葵复种在春小麦收获后土壤水分含量较高。春小麦收获后春小麦单作不再灌溉且无作物覆盖,而春小麦—向日葵复种和玉米单作、向日葵单作仍进行灌

溉,故春小麦收获后春小麦—向日葵复种和玉米单作、向日葵单作 0—40 cm 土层土壤水分含量出现波峰与波谷,而春小麦单作土壤水分含量则相对平稳。不同种植模式之间的土壤水分含量与灌溉时期、灌溉量和作物生长动态密切相关。

河套灌区农田的土壤盐分与当地的灌水时期、灌水量及耕作措施等密切相关^[12]。受上年“秋浇”洗盐的影响,春小麦播种时土壤盐分含量较低。河套灌区 3 月中旬到 5 月下旬为土壤冻融期,此期干燥少雨多风^[4-6],消融的水分易蒸发到空气中,水去盐留,形成土壤盐分表聚,造成表层土壤盐分含量增高。春小麦播种时进行了耕、耙等,破坏了土壤的毛细管结构,减少深层土壤水分持续蒸发到空气中;同时春小麦分蘖期及拔节期进行灌溉洗盐,将表层土壤盐分淋溶到深层土壤,且春小麦茎叶的遮阴覆盖可减少地表蒸发^[17-20],因而春小麦—向日葵复种和春小麦单作表层土壤积聚的土壤盐分低于玉米单作和向日葵单作。向日葵单作播种期较玉米单作晚 30 d,且播种之前未进行耕、耙等整地措施,土壤毛细管畅通又无作物覆盖,裸地蒸发强烈,因而向日葵单作表层土壤盐分积聚持续期长且积聚高峰高于玉米单作。春小麦收获后春小麦单作翻耕进入休闲期,不再进行灌溉,地表处于裸露状态,受土壤蒸发的影响,表层土壤盐分处于缓慢积累阶段,而春小麦—向日葵复种和玉米单作、向日葵单作在春小麦收获后进行灌溉且作物覆盖度较高,土壤水分蒸散以作物蒸腾为主,地表蒸发较弱^[17-19],因而表层土壤盐分含量较低且比较稳定。向日葵为耐盐作物,可吸收大量的土壤盐分^[9,12,26],但向日葵灌浆期未进行灌溉,而玉米单作进行了灌溉,将表层土壤盐分淋溶到深层土壤,因而生长后期向日葵单作表层土壤盐分高于玉米单作。春小麦收获后春小麦—向日葵复种的灌溉次数及总灌水量高于玉米单作,且春小麦收获时土壤含盐量已较低,因而春小麦—向日葵复种的表层土壤盐分在单作玉米成熟期(单作向日葵成熟期)和复种向日葵成熟期低于玉米单作和向日葵单作。

不同作物的产量、生物量与该作物的生长习性密切相关^[24-25]。春小麦为 C₃ 植物,生长期短,生长前期气温较低;玉米、向日葵为 C₄ 植物,生长动态与河套灌区的气温、日照变化同步,历经河套灌区光热资源最丰富的季节,且玉米、向日葵 CO₂ 补偿点低,干旱时可收缩气孔孔径,减少水分蒸腾,提高强光、高温下的光合速率,充分利用光、热资源^[9,12,26],因而玉米、向日葵单作的等价产量极显著高于春小麦单作。春小麦—向日葵复种与春小麦、玉米、向日葵单作相比,生长期长,可合成较多的光合产物,因而其等价产

量显著高于春小麦单作,略高于玉米单作和向日葵单作。春小麦一向向日葵复种灌溉量较大,耗水量较多,因而其水分利用效率低于玉米单作和向日葵单作。虽然春小麦一向向日葵复种的产值最高,但由于其投资较大,因而其净产值低于向日葵单作而高于玉米单作和春小麦单作。

3.2 结论

(1)河套灌区春小麦一向向日葵复种与春小麦、玉米、向日葵单作的土壤水分变化可划分为两个阶段,春小麦收获前春小麦一向向日葵复种与春小麦单作 0—100 cm 土层土壤水分低于向日葵单作和玉米单作;春小麦收获后春小麦一向向日葵复种和玉米单作、向日葵单作耕层土壤水分高于春小麦单作,20—80 cm 土层土壤水分则低于春小麦单作。

(2)不同种植方式主要影响 0—40 cm 土层土壤盐分,对 40 cm 以下土层土壤盐分影响相对较小。不同种植方式春小麦收获之前土壤盐分变化剧烈,春小麦收获之后变化平缓。复种向日葵收获期春小麦一向向日葵复种耕层土壤盐分较春小麦单作、玉米单作和向日葵单作分别降低 32.52%,16.70%和 24.92%,0—100 cm 土层分别降低 13.32%,8.88%和 12.07%。

(3)春小麦一向向日葵复种的等价产量较春小麦单作、玉米和向日葵单作分别高出 126.01%,3.86%和 3.21%,等价水分利用效率、等价水分生产率高于春小麦单作却低于向日葵单作和玉米单作。春小麦一向向日葵复种产值较春小麦、玉米、向日葵单作分别高出 143.55%,102.33%和 3.19%,净产值分别高出 176.15%,116.55%和 -13.26%。

(4)春小麦一向向日葵复种的净产值虽然低于向日葵单作,但可减少土壤盐分,提高单位面积的粮食产量及产值,故春小麦一向向日葵复种在河套灌区具有一定的发展前景。

参考文献:

[1] 邹超煜,白岗栓,任志宏,等.河套灌区春小麦后茬复种发展方向研究[J].安徽农业科学,2015,43(6):53-56,60.
 [2] 张海明,刘景辉,刘国军,等.内蒙古中西部小麦茬复种油用向日葵两熟制种植模式研究[J].华北农学报,2003,18(4):79-81.
 [3] 童文杰,刘倩,陈阜,等.河套灌区小麦耐盐性及其生态适宜区[J].作物学报,2012,38(5):909-913.
 [4] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J].水利学报,2009,40(4):403-412.
 [5] 郝远远,徐旭,任东阳,等.河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J].农业工程学报,2015,31(11):110-116.

[6] 梁建财,史海滨,李瑞平,等.覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):98-105.
 [7] Tfafschi I A, Aqutla R D. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics[J]. Agricultural Water Management,2005,77(1):308-322.
 [8] Benyamini Y, Mirlas V, Marish S, et al. A survey of soil salinity and groundwater level control systems irrigated fields in the Jezre'el Valley, Israel[J]. Agricultural Water Management,2005,76(3):181-194.
 [9] Marcum, K. B. Salinity tolerance mechanisms of grasses in the subfamily chlofidoideae[J]. Crop Science,1999,39:1153-1160.
 [10] 姬强,孙汉印,Taraqqi A K,等.不同耕作措施对冬小麦—夏玉米复种连作系统土壤有机碳和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2014,25(4):1029-1035.
 [11] 尹辉,张恩和,王琦,等.春小麦留茬处理对复种油菜产量和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2011,27(2):83-88.
 [12] 邹超煜,白岗栓.河套灌区土壤盐渍化成因及防治[J].人民黄河,2015,37(9):143-148.
 [13] Gao X Y, Huo Z L, Bai Y N, et al. Soil salt and groundwater change in flood irrigation field and uncultivated land: A case study based on 4-year field observations[J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(5):2127-2139.
 [14] Khalid U, Said M K, Inayatullah A, et al. Tillage and seed rate impact on wheat yield, soil organic matter and total soil nitrogen under rice-wheat cropping system in Northwestern Pakistan[J]. Philippine Agricultural Scientist,2012,95(2):160-168.
 [15] 杜社妮,白岗栓,于健,等.沙封覆膜种植孔促进盐碱地油葵生长[J].农业工程学报,2014,30(5):82-90.
 [16] 白岗栓,杜社妮,于健,等.激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J].农业工程学报,2013,29(8):125-134.
 [17] 赵永敢,王婧,李玉义,等.秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J].农业工程学报,2013,29(23):109-117.
 [18] 毕远杰,王全九,雪静.覆盖及水质对土壤水盐状况及油葵产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(增刊1):83-89.
 [19] 端毓文,苏德荣,房宸,等.滨海盐土施用脱硫石膏结合灌溉对高羊茅生长的影响[J].中国草地学报,2013,35(3):103-109.
 [20] Bhatti A U, Khan Q, Gurmani A H, et al. Effect of organic manure and chemical amendments on soil properties and crop yield on a salt affected Entisol[J]. Pedosphere,2005,15(1):46-51.

(下转第 258 页)

有待进一步研究。

4 结论

(1) 过量施氮是造成氮肥利用率低、损失率高和污染环境的主要原因,因此生产上既要保证较高的氮肥利用率,又要减少氮肥损失而带来的风险。本试验条件下,富士苹果营养转换期不同施氮处理的氮肥利用率为 5.75%~12.99%,残留率为 29.62%~39.74%,损失率为 47.27%~64.64%。

(2) 基于土壤氮素总平衡的方法,本试验条件下富士苹果营养转换期施氮 51.30 kg/hm² 或稍高于此值时,能够维持并提高土壤氮肥力。

参考文献:

- [1] 凌晓明,赵辉. 做好秋季果园管理提高果树贮藏营养[J]. 山西果树,2008(4):29-30.
- [2] 张爱敏,凤舞剑. 苹果树施肥的误区及科学对策[J]. 现代化农业,2016(10):20-23.
- [3] 魏绍冲,姜远茂. 山东省苹果园肥料施用现状调查分析[J]. 山东农业科学,2012,4(2):77-79.
- [4] 葛顺峰,姜远茂,魏绍冲,等. 不同供氮水平下幼龄苹果园氮素去向初探[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(4):949-955.
- [5] 山楠,杜连凤,毕晓庆,等. 用¹⁵N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(4):930-936.
- [6] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义:兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报,2014,51(5):921-933.
- [7] 巨晓棠. 理论施氮水平的改进及验证:兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报,2015,52(2):249-261.
- [8] 刘新宇,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):296-303.
- [9] 巨晓棠,谷保静. 氮素管理的指标[J]. 土壤学报,2017,54(2):281-296.
- [10] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature,2013,494(7438):459-462.
- [11] 徐明杰,张琳,汪新颖,等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):36-45.
- [12] Ladha J K, Krupnik T J, Six J. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. Advances in agronomy,2005,87(1):85-156.
- [13] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境[J]. 土壤学报,2002,39(增刊):3-11.
- [14] 王西娜,王朝辉,李华,等. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报,2016,53(5):1202-1212.
- [15] 韦剑锋,韦巧云,梁振华,等. 供氮水平对冬马铃薯氮肥利用效率及氮素去向的影响[J]. 土壤通报,2015,46(6):1483-1488.
- [16] 倪玉雪,尹兴,刘新宇,等. 华北平原冬小麦季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量化探索[J]. 生态环境学报,2013,22(3):392-397.
- [17] 汪新颖,彭亚静,王玮,等. 华北平原夏玉米季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量化探索[J]. 生态环境学报,2014,23(10):1610-1615.
- [18] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2009,106(9):3041-3046.
- [19] 王海云,姜远茂,彭福田,等. 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2008,39(1):31-38.
- [20] 巨晓棠,姜远茂,彭福田,等. 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2012,30(6):38-43.
- [21] 杜社妮,白岗栓,赵世伟,等. 沃特和 PAM 施用方式对土壤水分及玉米生长的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(11):30-35.
- [22] 白岗栓,邹超煜,杜社妮,等. 聚丙烯酰胺对干旱半干旱区不同作物水分利用及产值的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):101-110.
- [23] 杜桂娟,曹敏建,马凤江,等. 沈阳地区 3 种新型复种模式物质生产及资源利用效率分析[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(6):38-43.
- [24] 赵红香,宁堂原,聂良鹏,等. 不同收割高度玉米秸秆产量和营养成分的比较[J]. 中国农业科学,2013,46(20):4354-4361.
- [25] 于杰,郑琛,李发弟,等. 向日葵秸秆与全株玉米混合青贮饲料品质评定[J]. 草业学报,2013,22(5):198-204.
- [26] 郑艳艳,孙兆军,沈振荣,等. 盐碱地补灌膜草覆盖油葵生长效应研究[J]. 农业科学研究,2008,29(1):28-30.

(上接第 234 页)