唐建昭,柏会子,张新军,等.不同生产目标下农牧交错带燕麦生产的最优水氮组合[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):1-11.
Tang J Z, Bai H Z, Zhang X J, et al.Optimal combination of water and nitrogen for oat production under different production goals in the agro-pastoral ecotone[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(6):1-11.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202404055

不同生产目标下农牧交错带燕麦生产的最优水氮组合

唐建昭[1],柏会子[1],张新军[2],曹丽霞[2],黄鑫亮[3],刘剑锋[1],郭风华[1],周海涛[2*]

(1.河北省科学院 地理科学研究所 河北省地理信息开发应用技术创新中心,河北 石家庄 050011;
2.张家口市农业科学院 燕麦研究所,河北 张家口 075000;3.河北师范大学 地理科学学院,河北 石家庄 050024)

摘　要:[目的]北方农牧交错带地区长期面临水氮管理混乱和片面追求高产的问题,基于不同生产目标优化水氮耦合方案,对建立燕麦绿色高效生产体系具有重要意义。[方法]选择北方农牧交错带为研究区域,基于北方农牧交错带典型站点(河北省张家口市张北县)开展的燕麦水氮耦合大田试验数据校正APSIM—Oat模型,基于充分校正的APSIM—Oat模型在区域尺度上推荐该地区燕麦不同生产目标的最优水氮耦合方案。[结果]北方农牧交错带地区燕麦不同生产目标下水氮投入差异较大,$W_{90}N_{150}$(灌溉90 mm,施氮量150 kg·hm^{-2})或$W_{120}N_{150}$组合(灌溉120 mm,施氮量150 kg·hm^{-2})情景下燕麦产量最高,1780～3190 kg·hm^{-2},东部和中部地区高于西部地区。降低水氮投入可进一步提高氮肥利用效率,获得最高氮肥利用效率的水氮耦合方案为$W_{30}N_{30}$(灌溉30 mm,施氮量30 kg·hm^{-2}),最高氮肥利用效率区域平均值为33.7 kg·hm^{-2}·kg^{-1},东部氮肥利用效率高于中部和西部地区。降低灌溉投入,保持氮肥投入燕麦可获得最大收益,$W_{60}N_{150}$(灌溉60 mm,施氮量150 kg·hm^{-2})或$W_{90}N_{150}$组合(灌溉90 mm,施氮量kg·hm^{-2})情景下燕麦收益最高,为2940～6700元·hm^{-2},中部地区种植燕麦收益高于东部和西部地区。[结论]与获得最高产量水氮投入相比,减少灌溉(降低60～90 mm)和氮肥(降低120 kg·hm^{-2})可获得最高氮肥利用效率;施氮量保持不变,灌溉投入降低30～60 mm,可获得最高收益。

关键词:燕麦; 产量; 灌溉; 氮肥利用效率; 收益
中图分类号:S512.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)06-0001-11

农业用水占淡水总消耗量60%以上,水资源不足是北方旱作区农业可持续发展的主要限制因子[1-2]。优化灌溉方案可有效提高作物产量、品质和水分利用效率,是缓解我国农业用水不足的主要措施[3-5]。氮肥是影响作物生长的另一主要因子[6]。氮肥不足或过量均对作物发育造成负面影响,降低产量和品质[7-9]。中国氮肥投入与作物需求严重失衡,1990年以来中国氮肥投入总量增长158%,而作物总产仅提升70%[10]。过量施用氮肥不仅造成农业生产成本提升,同时加剧环境污染[11]。因此,优化氮肥施用对保证作物高产稳产、提高氮肥利用效率和降低环境污染具有积极作用。前人研究表明,灌溉和氮肥存在交互作用,适宜的灌溉方案可提升氮肥利用效率和作物产量[12]。因此,最优施氮方案随着灌溉方案的变化而变化。

燕麦是全球范围内普遍认知的具有保健作用的作物,其在降低人体脂肪率和控制糖分等方面具有积极作用[13]。燕麦对干旱抗性强且对不同环境适应性较强,是我国生态交错区主要的粮食作物兼饲料作物[14]。籽粒燕麦年生产面积稳定在37万hm^2,年总产量在54.6万t左右,全球范围内排名第八[15]。北方农牧交错带地区气候冷凉,适宜燕麦生长,是我国燕麦主产区,该区燕麦总产占全国燕麦总产70%以上[16],燕麦高产稳产对北方农牧交错带地区粮食安全具有重要意义。

收稿日期:2024-04-19　　**修回日期**:2024-07-20
基金项目:河北省科学院科技计划项目(2023PF04-1);国家燕麦荞麦产业技术体系水分生理与节水栽培岗(CARS07-B-03)
作者简介:唐建昭(ORCID:0009-0003-6387-5058),副研究员,博士,研究方向:作物系统模拟
*通信作者:周海涛,研究员,Email: zht0206@163.com

不同地区燕麦需水量和需水强度差异较大,研究表明北方农牧交错带地区燕麦生育期需水量在300~500 mm[17]。农牧交错带地区作物生长季降水量小于400 mm[18],水分短缺严重限制该地区燕麦生产。优化水氮耦合方案是提高作物水分利用效率的有效措施[19]。前人研究表明合理的水氮耦合方案显著提升燕麦产量[20]、水分利用效率[21]、光合速率[22]和酶活性[14]等。水氮投入是决定燕麦收益的重要因子,前人研究表明优化水氮耦合方案可进一步提升种植燕麦的经济收益[20]。然而,获得最高产量、最高水氮利用效率和最高收益条件下水氮投入具有哪些差异鲜有研究。

前人主要采用大田试验和统计模型的方法制定单点尺度最优灌溉和施肥方案。进行田间试验需投入大量的人力、物力和财力,同时受到试验年份的制约,并且站点尺度的试验结果在区域尺度上不具备代表性[23]。统计模型机理性差,并且建模所需的数据量大[24]。作物模型具备模拟气候-土壤-管理耦合对作物生长影响的能力,在制定不同区域作物最适灌溉和施肥方案研究方面广泛应用[25]。APSIM-Oat模型是作物生长机理模型的典型代表,主要特点是注重土壤过程,如土壤水、氮、有机质以及土壤氮和土壤水分运动密切相关的地表留茬问题。本研究选择APSIM-Oat模型为研究工具,针对农牧交错带地区燕麦生产水氮管理混乱的问题,开展燕麦水氮耦合方案优化研究,主要研究目标包括:1)推荐燕麦不同生产目标包括产量最高、水分利用效率最高、氮肥利用效率最高和经济收益最高的水氮耦合方案;2)揭示不同生产目标下水氮投入对水分利用效率、氮肥利用效率、土壤水和地下水等的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据资料

研究区域(图1)为北方农牧交错带地区(36°08′~50°15′N,104°09′~123°25′E)。研究区域燕麦可播期为4月30日-6月10日,通常实际生产中播种燕麦的时间集中在5月中下旬,收获期集中在9月上旬以避免霜冻[26]。燕麦生长季(5-9月)平均温度为15.4 ℃,总降水量为326 mm。基于研究数据包括气象数据和土壤数据的有效性和完整性,研究区域内共选择27个站点。

研究时段(1981-2020年)各研究站点的日照时数(h)、日最高温度和最低温度(℃)和日降水量(mm)均来自中国气象局(http://www.cma.gov.cn/)。基于日照时数计算总辐射,计算方法为Angström-Prescott方程。

研究区域土壤理化性质数据包括容重、土壤水分特征数据(凋萎含水量、田间持水量和饱和含水量)和养分数据等来自中国土壤数据库(http://vdb3.soil.csdb.cn/)。

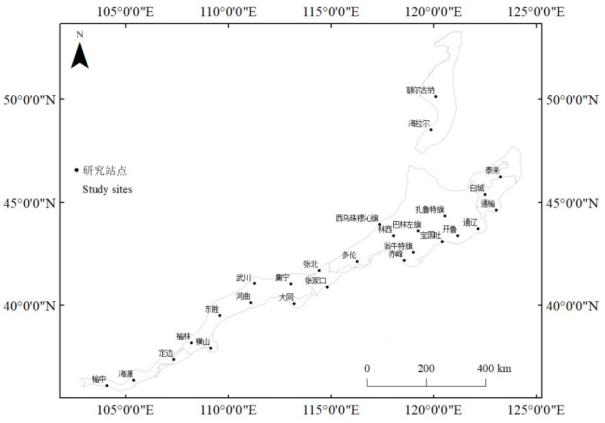


图1 研究区域

Fig.1 Study area

1.2 研究方法

1.2.1 田间试验

燕麦水氮耦合大田试验于2021-2023年在河北省张家口市张北县农业科学院喜顺沟试验基地(41°04′N,114°43′E,海拔1450 m)进行。供试品种为'坝莜1号',生育期长度90 d左右。试验年份燕麦播种采用条播方式,播种量为150 kg·hm^{-2},3年内播种日期分别为5月15日、5月17日和5月12日。试验小区选取平整地块,单个小区面积60 m^2,东西行向,采用完全随机区组方式排列,3个重复,各小区之间用1 m保护行隔开,为避免各小区之间水分侧漏影响,在每个小区周围埋入40 cm深PVC板。磷肥和钾肥施用量参考当地常规用量,过磷酸钙120 kg·hm^{-2}(P_2O_5质量分数为20%),氯化钾37.5 kg·hm^{-2}(K_2O质量分数为60%),磷钾肥均做底肥一次性施入。基于当地施肥和灌溉情况及测土配方施肥和养分专家推荐,灌溉和施氮肥分别设置4个梯度,灌溉梯度为0 mm(W_0)、50 mm(W_{50})、100 mm(W_{100})和150 mm(W_{150});施氮肥梯度为0 kg·hm^{-2}(N_0)、50 kg·hm^{-2}(N_{50})、100 kg·hm^{-2}

(N_{100})和150 kg·hm^{-2}(N_{150})。其中,2021年和2022年共有4种水氮耦合方式,分别为W_0N_0、W_1N_1、W_2N_2和W_3N_3;2023年各梯度水氮均进行组合,共16种耦合方式。氮肥40%作基肥,60%按生育期灌水量分别追施。记录的燕麦生育期包括播种、出苗、拔节期、孕穗期、扬花期和成熟期,生育期内采用烘干称重法测定土壤含水量。选取小区中部1 m^{2}进行测产。

1.2.2　APSIM－Oat模型调参与验证

APSIM-Oat中关键模块包括作物、土壤和管理模块。模型基于气象数据、土壤数据和管理数据模拟燕麦日生长发育,包括生育期、生物量积累和产量形成等过程。土壤模块包括土壤水、氮和有机质利用过程。管理模块包括播期、灌溉和施肥等措施的设定。本研究利用2021-2023年试验数校正APSIM-Oat模型,其中2021-2022年试验数据用于模型调参,2023年试验数据用于模型校正。利用模型模拟值和观测值线性回归的决定系数(R^2)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)和相对均方根误差(normalized root mean squared error, NRMSE)评价模型的模拟效果。R^2、RMSE和NRMSE计算公式如下:

$$R^2=\frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_i-O_{avg})(S_i-S_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-O_{avg})^2\sum_{i=1}^{n}(S_i-S_{avg})^2} \quad (1)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE=\frac{RMSE}{O_{avg}} \quad (3)$$

式中,O_i、O_{avg}、S_i和S_{avg}分别为观测值、观测值平均值、模拟值和模拟值平均值;n为样本数量。

APSIM-Oat模型具备模拟燕麦不同水氮耦合方案下生育期内土壤水和产量的能力(图2)。不同水氮耦合方案下,土壤水调参年份模拟值和观测值NRMSE为11.5%(图2a),验证年份为13.2%(图2b)。调参年份燕麦产量模拟值和观测值的NRMSE为15.3%(图2c),验证年份为12.2%(图2d)。

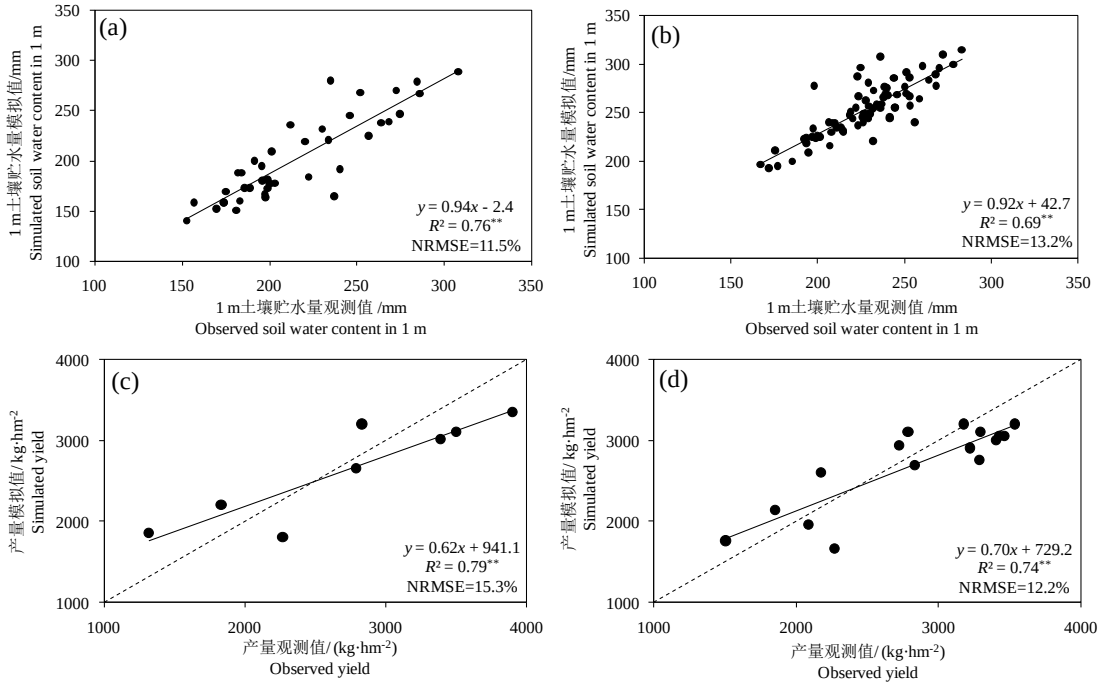
表1　燕麦品种在APSIM－Oat模型中参数设置

Table 1　Parameters of oat variety used in the APSIM－Oat model

参数 Parameters	定义 Definition	数值 Values
tt_end_of_juvenile/(℃·d)	出苗－营养生长期结束的积温	550
tt_loral_initiation/(℃·d)	初花期－盛花期积温	320
tt_flowering/(℃·d)	盛花期－灌浆期积温	200
tt_start_grain_fill/(℃·d)	灌浆期开始－结束积温	350
tt_end_grain fill/(℃·d)	灌浆期结束－成熟积温	30
vern_sens	春化指数	0.5
photop_sens	光周期指数	2.0
potential_grain_filling_rate/(mg·grain^{-1}·day^{-1})	灌浆速率	0.001 5
potential_grain_growth_rate/(mg·grain^{-1}·day^{-1})	盛花期－灌浆期籽粒生长速率	0.001
grains_per_gram_stem/(kernels·g^{-1})	穗粒数	21
max_grain_size/(g·grain^{-1})	最大籽粒质量	0.041

1.2.3　APSIM－Oat模型模拟设置

研究时段为1981-2020年,基于校正的APSIM-Oat模型设置不同水氮耦合方案,模拟分析不同方案下产量、耗水量、土壤水分动态、水分利用效率、氮肥利用效率和收益,并根据燕麦产量最高、水分利用效率最高、氮肥利用效率最高和收益最高等目标制定最优水氮耦合方案。灌溉量范围设置为0～150 mm,间隔30 mm,不同灌溉量分别表示为W_0、W_{30}、W_{60}、W_{90}、W_{120}和W_{150};施氮量范围设置为0～150 kg·hm^{-2},间隔为30 kg·hm^{-2},氮肥40%作基肥,60%作追肥,不同施氮量分别表示为N_0、N_{30}、N_{60}、N_{90}、N_{120}和N_{150};不同灌溉和施氮量进



图中虚线代表1∶1线。a和c代表调参年份结果,b和d代表验证年份结果。**代表差异显著($P<0.01$)

Dashed line is 1∶1 line. a and c represent calibration results, b and d represent validation results. ** indicates statistical significance at 0.01 level

图2 燕麦生育期内土壤水分动态和产量的调参和验证结果

Fig.2 Comparisons between simulated and observed soil water content and yield

行耦合,共计36个水氮耦合方案。灌溉时期和追肥时期均为苗期、开花期和灌浆期,具体水氮耦合方案见表2。

1.2.4 燕麦水分利用效率和氮肥利用效率计算方法

燕麦水分利用效率(WUE)基于燕麦产量(Y)和耗水量(ET)的比值计算[21],具体公式为:

$$\mathrm{WUE}=Y/\mathrm{ET} \tag{4}$$

式中,燕麦耗水量基于燕麦生育期内土壤蒸发量(ES)和燕麦蒸腾量(EP)求和计算,ES和EP由APSIM-Oat模型直接输出。

燕麦氮肥利用效率(NUE)为燕麦产量(Y)和施氮量(TN)的比值[6],计算公式如下:

$$\mathrm{NUE}=Y/\mathrm{TN} \tag{5}$$

地下水总消耗量(CGW)基于总灌溉量(IRR)和土壤总渗漏量(D)的差值计算[11]:

$$\mathrm{CGW}=\mathrm{IRR}-D \tag{6}$$

其中,D由APSIM-Oat模型模拟输出值。

播前土壤含水量由APSIM-Oat模型直接模拟输出。

1.2.5 燕麦生产净收益计算方法

燕麦生产的净收益根据下式计算:

$$\mathrm{NI}=Y\times P-\mathrm{Inputs} \tag{7}$$

式中,Y为燕麦单产,P为燕麦的市场单价,本研究基于市场收购价格设定为2.8元·kg^{-1},$Y\times P$为燕麦单产的总收入。基于当地市场调研,燕麦各项生产投入费用如表3所示。

2 结果与分析

2.1 燕麦获得最高产量和水分利用效率的水氮组合

在北方农牧交错带地区,采取$W_{90}N_{150}$(灌溉投入90 mm,施氮投入150 kg·hm^{-2})或$W_{120}N_{150}$耦合方案(灌溉投入120 mm,施氮投入150 kg·hm^{-2})燕麦产量最高,$W_{90}N_{150}$组合主要集中在西部地区,$W_{120}N_{150}$主要集中在东部地区。不同区域最高产量为1780~3190 kg·hm^{-2},平均值为2605 kg·hm^{-2},东部和中部地区最高产量高于西部地区(图3a)。获

表2　APSIM－Oat中灌溉和施氮肥方案

Table 2　The application plan of irrigation and nitrogen in the APSIM－Oat model

处理 Treatments		灌溉量/mm Irrigation amount			施氮量/(kg·hm^{-2}) Nitrogen fertilizer amount			
		苗期 Emergence	开花期 Flowering	灌浆期 Grain filling	播前 Pre－sowing	苗期 Emergence	开花期 Flowering	灌浆期 Grain filling
W_0	N_0	0	0	0	0	0	0	0
	N_{30}	0	0	0	12	6	6	6
	N_{60}	0	0	0	24	12	12	12
	N_{90}	0	0	0	36	18	18	18
	N_{120}	0	0	0	48	24	24	24
	N_{150}	0	0	0	60	30	30	30
W_{30}	N_0	10	10	10	0	0	0	0
	N_{30}	10	10	10	12	6	6	6
	N_{60}	10	10	10	24	12	12	12
	N_{90}	10	10	10	36	18	18	18
	N_{120}	10	10	10	48	24	24	24
	N_{150}	10	10	10	60	30	30	30
W_{60}	N_0	20	20	20	0	0	0	0
	N_{30}	20	20	20	12	6	6	6
	N_{60}	20	20	20	24	12	12	12
	N_{90}	20	20	20	36	18	18	18
	N_{120}	20	20	20	48	24	24	24
	N_{150}	20	20	20	60	30	30	30
W_{90}	N_0	30	30	30	0	0	0	0
	N_{30}	30	30	30	12	6	6	6
	N_{60}	30	30	30	24	12	12	12
	N_{90}	30	30	30	36	18	18	18
	N_{120}	30	30	30	48	24	24	24
	N_{150}	30	30	30	60	30	30	30
W_{120}	N_0	40	40	40	0	0	0	0
	N_{30}	40	40	40	12	6	6	6
	N_{60}	40	40	40	24	12	12	12
	N_{90}	40	40	40	36	18	18	18
	N_{120}	40	40	40	48	24	24	24
	N_{150}	40	40	40	60	30	30	30
W_{150}	N_0	50	50	50	0	0	0	0
	N_{30}	50	50	50	12	6	6	6
	N_{60}	50	50	50	24	12	12	12
	N_{90}	50	50	50	36	18	18	18
	N_{120}	50	50	50	48	24	24	24
	N_{150}	50	50	50	60	30	30	30

得最高产量水氮耦合方案下,燕麦生育期耗水量为249～451 mm,平均值为352 mm,东部地区高于中部和西部地区(图3b);水分利用效率为4.4～10.6 kg·hm^{-2}·mm^{-1},平均值为7.4 kg·hm^{-2}·mm^{-1},中部地区水分利用效率高于西部和东部地区(图3c);氮肥利用效率为11.7～20.2 kg·hm^{-2}·kg^{-1},均值为17.3 kg·hm^{-2}·kg^{-1},西部地区氮肥利用效率低于中部和东部地区(图3d)。获得最高产量水氮耦合方案下,北方农牧交错带地区1981-2020年地下水总消耗量为4900～5100 mm,东部地区地下水总

表3 北方农牧交错带地区燕麦生产各项投入

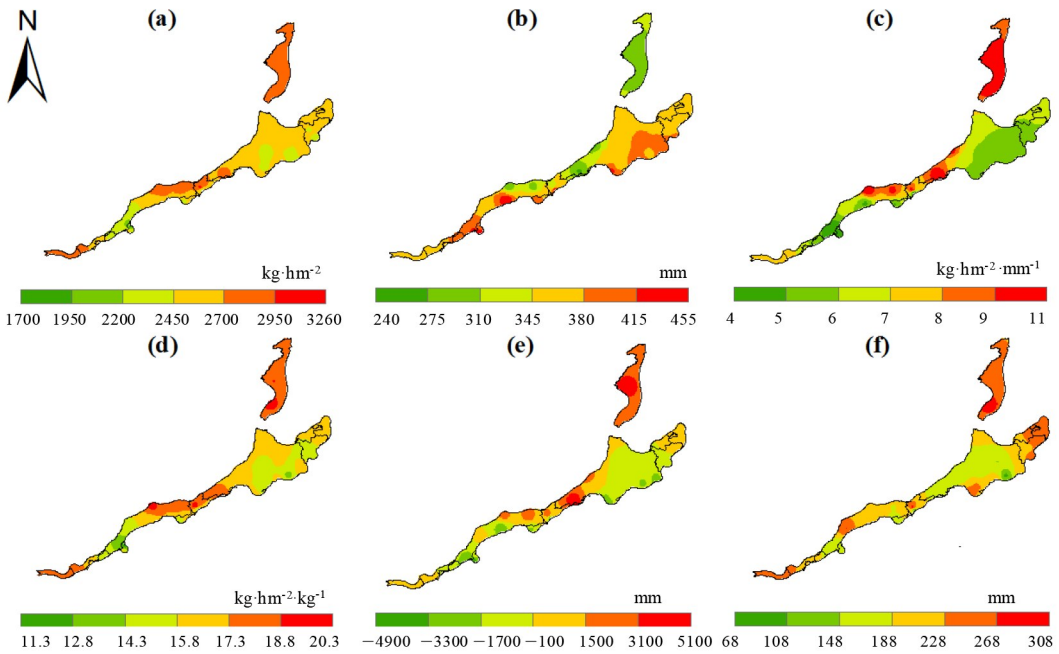
Table 3 The costs of the agricultural inputs of oat cultivation in the agro-pastoral ecotone

投入 Field inputs	单价 Price
种子/(元·kg^{-1})	3.5
氮肥/(元·kg^{-1})	4
除草和杀虫剂/(元·hm^{-2})	200
翻耕和播种/(元·hm^{-2})	500
收获/(元·hm^{-2})	500

消耗量高于中部和西部地区(图3e);1981-2020年燕麦播前土壤含水量为70～305 mm,平均值为197 mm,东部和西部地区播前土壤含水量高于中部地区(图3f)。

2.2 燕麦获得最高氮肥利用效率的水氮组合

在北方农牧交错带地区,采取$W_{30}N_{30}$(灌溉投入30 mm,施氮量投入30 kg·hm^{-2})耦合方案下燕麦氮肥利用效率最高。不同区域最高氮肥利用效率为20.6～46.4 kg·hm^{-2}·kg^{-1},均值33.7 kg·hm^{-2}·kg^{-1},区域尺度上东部氮肥利用效率高于中部和西部地区(图4a)。获得最高氮肥利用效率水氮耦合方案下,北方农牧交错带地区燕麦产量为620～1410 kg·hm^{-2},均值为1010 kg·hm^{-2},区域尺度上东部和西部产量较高(图4b);燕麦生育期耗水量为262～349 mm,均值为339 mm,区域尺度上东部和西部耗水量较高(图4c);水分利用效率为2.4～3.5 kg·hm^{-2}·mm^{-1},均值为3.0 kg·hm^{-2}·mm^{-1},区域尺度上东部地区水分利用效率较高(图4d)。获得最高氮肥利用效率水氮耦合方案下,北方农牧交错带地区1981-2020年地下水总消耗量为－2000～4600 mm,中部地区地下水总消耗量高于其它地区(图4e);1981-2020年燕麦播前土壤含水量为102～283 mm,均值为204 mm,中部地区播前土壤含水量高于其它地区(图4f)。



a、b、c、d、e和f分别代表燕麦产量、生育期蒸散量、水分利用效率、氮肥利用效率、地下水总消耗量和播前土壤含水量

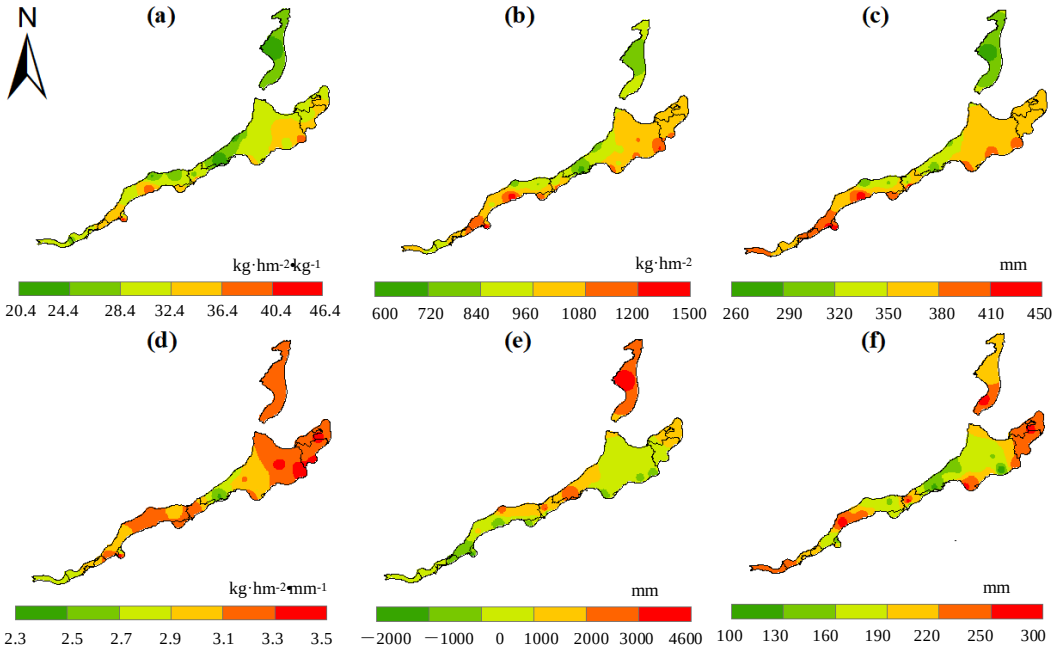
a, b, c, d, e and f represent oat yield, evaportransipiration, water use efficiency, nitrogen use efficiency, net groundwater use, and pre-planting soil water content in 1 m depth

图3 北方农牧交错带地区1981-2020年获得最高产量水氮耦合方案的不同指标

Fig.3 The indexes under the combinations of irrigation and nitrogen that maximized oat yield in 1981-2020 in the agro-pastoral ecotone

2.3 燕麦获得最高收益的水氮组合

在北方农牧交错带地区,采取$W_{60}N_{150}$(灌溉投入60 mm,施氮量投入150 kg·hm^{-2})或$W_{90}N_{150}$(灌溉投入90 mm,施氮量投入150 kg·hm^{-2})耦合方案下燕麦收益最高。不同区域燕麦最高收益为2940～6700 元·hm^{-2},均值为5170 元·hm^{-2},中部地区种植燕麦收益高于东部和西部地区(图5a);燕麦生育期耗水量为235～439 mm,均值为338 mm,



a、b、c、d、e和f分别代表燕麦氮肥利用效率(NUE)、产量(Y)、生育期蒸散量(ET)、、水分利用效率(WUE)、地下水总消耗量(GGW)和播前土壤含水量

a, b, c, d, e and f represent oat nitrogen use efficiency (NUE), yield(Y), evaportransipiration (ET), water use efficiency (WUE), net groundwater use (GGW) and pre−planting soil water content in 1 m depth. respectively

图4　北方农牧交错带地区1981-2020年获得最高氮肥利用效率水氮耦合方案的不同指标

Fig.4　The indexes under the combinations of irrigation and nitrogen that maximized oat NUE in 1981-2020 in the agro-pastoral ecotone

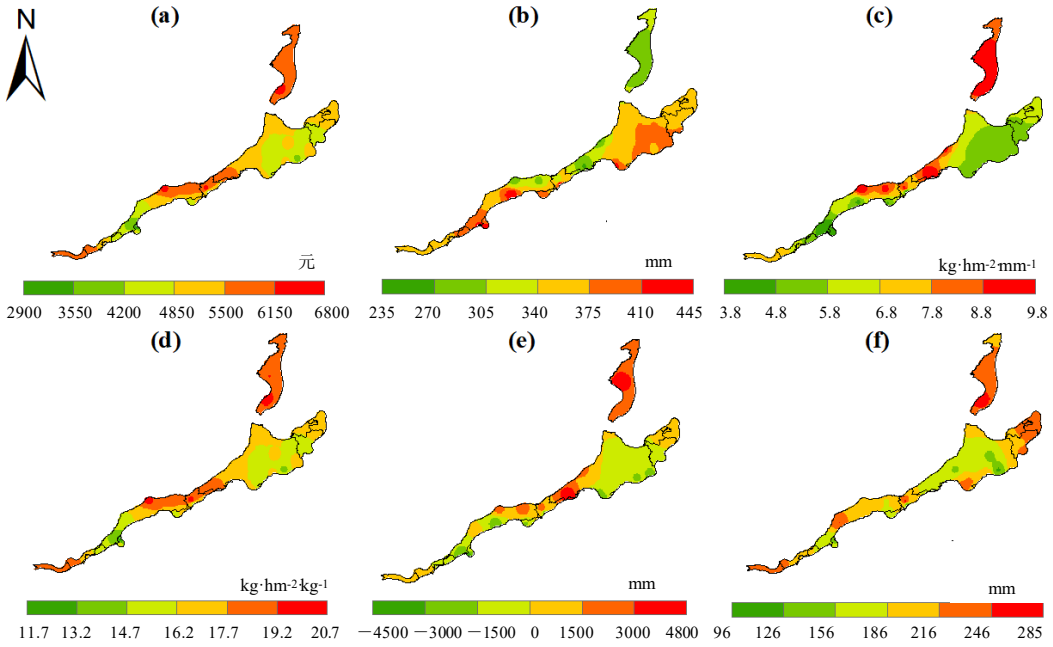
中部地区耗水量低于东部和西部地区(图4b);燕麦水分利用效率为3.9～9.7 kg·hm^{-2}·mm^{-1},均值为6.5 kg·hm^{-2}·mm^{-1},中部地区水分利用效率高于西部和东部地区(图4c);燕麦氮肥利用效率为11.8～20.6 kg·hm^{-2}·kg^{-1},均值为17.1 kg·hm^{-2}·kg^{-1},西部地区氮肥利用效率低于中部和东部地区(图4d)。获得最高收益水氮耦合方案下,北方农牧交错带地区1981-2020年地下水总消耗量为−4500～4800 mm,中部地区地下水总消耗量低于东部和西部地区(图4e);1981-2020年燕麦播前土壤含水量在96～285 mm之间,平均值为191 mm,东部和西部地区播前土壤含水量高于中部地区(图4f)。

3　讨论

研究区域作物生长季内可获得总降水量少,并且不同年份降水总量变异剧烈,水分短缺严重限制当地作物产量提升[26]。一些地区片面追求燕麦高产,过量投入水肥,对当地环境造成严重的负面影响[27]。灌溉和施肥是影响燕麦产量的2个关键因素,平衡两者关系使其达到最优是实现燕麦高效生产的关键[19]。针对北方农牧交错带地区,本研究推荐2个水氮耦合方案:$W_{90}N_{150}$(灌溉90 mm,施氮150 kg·hm^{-2})和$W_{120}N_{150}$(灌溉120 mm,施氮150 kg·hm^{-2}),以实现燕麦的最高产量。前人基于大田试验研究表明该地区灌溉投入110 mm搭配施氮135 kg·hm^{-2}燕麦产量最高[22],灌溉投入与本研究一致,氮肥投入低于本研究推荐,主要是因为前人选择的试验田基础肥力更高。区域尺度上,农牧交错带西部地区燕麦最高产量低于东部和中部地区,这主要是因为东部和中部地区燕麦生育期温度更接近最适温度[28]。

基于以上发现,我们进一步探讨不同水氮耦合方案对水分利用效率和氮肥利用效率的影响。提高作物水分利用效率对缓解当地水资源危机具有重要意义[29]。作物水分利用效率由作物产量和耗水量共同决定[30],本研究表明燕麦获得最高产量的水氮组合其水分利用效率最高。作物耗水量由土壤蒸发和作物蒸腾2部分组成[31],分析燕麦耗水数据发现不同水氮耦合情景下土壤蒸发量呈现一定的保守性,随着灌溉量的增加燕麦蒸腾量和产量增加,且产量增加幅度高于蒸腾量增加幅度,因此最高产量情景下燕麦水分利用效率最高。

本研究进一步以氮肥利用效率最高为目标优



a、b、c、d、e和f分别代表燕麦收益、生育期蒸散量、水分利用效率、氮肥利用效率、地下水总消耗量和播前土壤含水量

a, b, c, d, e and f represent oat income, evaportransipiration, water use efficiency, nitrogen use efficiency, net groundwater use, and pre−planting soil water content in 1 m depth. respectively

图5 农牧交错带地区1981-2020年获得最高收益水氮耦合方案的不同指标

Fig.5 The indexesunder the combinations of irrigation and nitrogen that maximized oat income in 1981-2020 in the agro-pastoral ecotone

化北方农牧交错带地区燕麦生产的水氮耦合方案,相比于最高产量水氮投入,减少灌溉(降低60～90 mm)和氮肥(降低120 kg·hm^{-2})投入可获得最高氮肥利用效率,即当灌溉投入30 mm耦合氮肥投入30 kg·hm^{-2}燕麦氮肥利用效率最高。燕麦生长对氮肥敏感,氮肥不足严重限制其生物量积累和产量形成[19]。北方农牧交错带地区土壤贫瘠,基础肥力无法满足燕麦对氮肥的需求,前人研究表明基础肥力条件下施用氮肥显著提升燕麦产量[32],与本研究结果一致。作物产量随着施氮量增加呈上升趋势[27],当施氮量超过一定量后产量提升变缓,氮肥利用效率呈下降趋势。因此,施氮量为30 kg·hm^{-2}燕麦氮肥利用效率最高。区域尺度上东部氮肥利用效率高于中部和西部地区,这主要是因为东部地区燕麦生育期温度低于其它地区,氮挥发量较低。

作物产量或生物量和生产投入共同决定收益[29]。本研究中产量和水分利用效率最高情景下水氮投入过量,增加生产成本;而氮肥利用效率最高情景下,产量相对较低,因此以上生产目标下均不能使收益最大化。本研究表明相比于获得最高产量水氮投入,施氮量保持不变,灌溉投入降低30～60 mm,可获得最高收益,即灌溉投入60 mm或90 mm耦合氮肥投入150 kg·hm^{-2}燕麦收益最高,区域平均收益为5170元·hm^{-2}。前人基于调研和大田试验发现该地区种植燕麦收益为年均3280～10 050元·hm^{-2}[33-34],其中基于调研数据获得的生产者实际收益低于本研究收益,主要是因为当地生产者管理粗放,燕麦实际产量较低;基于大田试验计算的收益略高于本研究,主要是因为前人研究考虑秸秆收益,本研究中将秸秆直接还田,未考虑其收益。

总之,本研究推荐的不同生产目标下燕麦最优水氮耦合方案不仅有助于提升燕麦产量,还有助于提高水肥资源利用效率,对当地农业可持续发展具有重要意义。但是本研究仍存在一些不足:第一,模型模拟中农田处于最优条件,实际生产中灌溉和氮肥管理存在差异,不同灌溉和施肥方式均对水肥利用效率产生重要影响,而模型中无法进一步考虑灌溉和施肥方式的影响;第二,燕麦实际生产中病虫害对其产生重要影响,但是基于APSIM-Oat模型的模拟结果无法评估病虫害对燕麦造成的产量损失,模拟的燕麦产量可能会高于实际产量;第三,本研究选择APSIM-Oat模

型作为研究工具,但是不同作物生长机理模型开发机理存在差异,运用一种模型模拟结果的不确定性可能较高,下一步研究应基于多模型开展燕麦不同生产目标下水氮耦合优化研究。第四,本研究只选择一个品种开展模拟研究,不同品种由于生长特性的差异,其水氮需求也不同,不同生产目标下水氮耦合方案可能会发生改变,下一步研究中应考虑更多品种。

4　结论

(1)燕麦获得最高产量的水氮投入量高于其它生产目标。

(2)燕麦获得最高氮肥利用效率水氮耦合情景下地下水消耗最少。

(3)北方农牧交错带中部地区种植燕麦收益高于西部和东部地区。

参　考　文　献

[1]王玉宝, 吴普特, 赵西宁, 等. 我国农业用水结构演变态势分析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 399-404.
Wang Y B, Wu P T, Zhao X N, et al. Development tendency of agricultural water structure in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 399-404.

[2]操信春,刘喆,吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 94-100.
Cao X C, Liu Z, Wu M Y, et al. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 94-100.

[3]刘增进, 李宝萍,李远华, 等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 58-63.
Liu Z J, Li B P, Li Y H, et al. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(4): 58-63.

[4]张红娟, 李赟, 李雅丽, 等. 北方农牧交错带裸燕麦蒸散结构与灌溉制度优化研究[J]. 节水灌溉, 2022(3): 8-14.
Zhang H J, Li Y, Li Y L, et al. Study on evapotranspiration structure and irrigation system optimization of naked oat in agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Water Saving Irrigation, 2022(3): 8-14.

[5]时荣超,郭文忠. 农业灌溉水资源优化配置研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 1-13.
Shi R C, Guo W Z. Research progress on the optimal allocation of agricultural irrigation water resources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 1-13.

[6]张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.

[7]崔佩佩, 丁玉川, 焦晓燕, 等. 氮肥对作物的影响研究进展[J]. 山西农业科学, 2017, 45(4): 663-668.
Cui P P, Ding Y C, Jiao X Y, et al. Research advances on effects of nitrogen fertilizer application on crops[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 663-668.

[8]胡梦芸, 门福圆, 张颖君, 等. 水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 332-340.
Hu M Y, Men F Y, Zhang Y J, et al. Research progress on water-nitrogen interaction and its effects on crop growth and utilization of nitrogen[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(3): 332-340.

[9]段宏凯, 王宏富, 鱼冰星, 等. 多年秸秆还田后减追氮肥对玉米穗位叶光合特性和衰老生理的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(12): 8-14.
Duan H K, Wang H F, Yu B X, et al. Effects of reducing nitrogen application on photosynthetic characteristics and physiology of ear leaf senescence of maize in the field with continuous straw return[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 38(12): 8-14.

[10]Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Development of regional nitrogen rate guidelines for intensive cropping systems in China[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(5): 1411-1416.

[11]Tang J Z, Xiao D P, Wang J, et al. Optimizing water and nitrogen managements for potato production in the agro-pastoral ecotone in North China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 253: 106945.

[12]张经廷, 吕丽华, 张丽华, 等. 作物水肥耦合类型量化方法在华北冬小麦水氮配置中的应用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17): 2997-3007.
Zhang J T, Lü L H, Zhang L H, et al. A novel method for quantitating water and fertilizer coupling types and its application in optimizing water and nitrogen combination in winter wheat in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(17): 2997-3007.

[13]Marshall A, Cowan S, Edwards S, et al. Crops that feed the world 9. Oats- a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications[J]. Food Security, 2013, 5(1): 13-33.

[14]赵宝平, 刘景辉, 任长忠. 燕麦产量形成生理机制研究进展[J]. 作物杂志, 2021(3): 1-7.
Zhao B P, Liu J H, Ren C Z. Research progress of physiological mechanism of yield formation in oats[J]. Crops, 2021(3): 1-7.

[15]中国农业科学院农业信息研究所. 中国农业统计资料:1978-2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
Agricultural Information Institute of CAAS. China Agriculture Statistical Report: 1978-2019[M]. Beijing: China Agriculture

Press, 2023.

[16]胡新中, 王凤梧, 周海涛. 燕麦产业行情渐涨[EB/OL]. (2021-02-10)[2024-04-19]. https://inter-cereal.snnu.edu.cn/info/1116/1333.htm.
Hu X Z, Wang F W, Zhou H T. The oat industry market is gradually rising [EB/OL]. (2021-02-10) [2024-04-19]. https://inter-cereal.snnu.edu.cn/info/1116/1333.htm.

[17]孙洪仁, 王显国, 李茂娜, 等. 我国燕麦需水规律研究[J]. 中国奶牛, 2023(8): 61-65.
Sun H R, Wang X G, Li M N, et al. Regularity of water demand of oats in China[J]. China Dairy Cattle, 2023(8): 61-65.

[18]李栋梁, 吕兰芝. 中国农牧交错带的气候特征与演变[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 483-488.
Li D L, Lü L Z. Climate characters and evolution of agricultural and pasturing interlaced zone in China[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(5): 483-488.

[19]邵志远, 蒋静, 张毅, 等. 不同灌水和施氮处理对燕麦产量、耗水特性和土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 84-89.
Shao Z Y, Jiang J, Zhang Y, et al. The combined effect of irrigation and nitrogen application on yield, water consumption of oat and soil salinity[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 84-89.

[20]张平珍, 张克厚, 陈莺, 等. 灌溉条件下燕麦氮、磷、钾配方施肥效应分析及与产量回归模型的建立[J]. 作物杂志, 2021(5): 101-107.
Zhang P Z, Zhang K H, Chen Y, et al. The effects analysis of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization on oat and establishment of yield regression model under irrigation condition[J]. Crops, 2021(5): 101-107.

[21]赵宝平, 庞云, 曾昭海, 等. 有限灌溉对燕麦产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 105-108, 115.
Zhao B P, Pang Y, Zeng Z H, et al. Effect of limited irrigation on yield and water use efficiency of oats [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 105-108, 115.

[22]刘锁云, 陈磊庆, 胡廷会, 等. 水氮耦合对燕麦光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(1): 60-67.
Liu S Y, Chen L Q, Hu T H, et al. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics of oat [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(1): 60-67.

[23]He D, Wang E L, Wang J, et al. Data requirement for effective calibration of process-based crop models [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 234-235: 136-148.

[24]Tang J Z, Wang J, He D, et al. Comparison of the impacts of climate change on potential productivity of different staple crops in the agro-pastoral ecotone of North China[J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(6): 983-997.

[25]唐建昭, 王靖, 肖登攀, 等. 马铃薯生长模型的研究进展及发展前景[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 921-932.
Tang J Z, Wang J, Xiao D P, et al. Research progress and development prospect of potato growth model [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(5): 921-932.

[26]Tang J Z, Wang J, Wang E L, et al. Identifying key meteorological factors to yield variation of potato and the optimal planting date in the agro-pastoral ecotone in North China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256-257: 283-291.

[27]李振松, 李向林, 万里强. 水氮耦合对科尔沁沙地燕麦生产性能的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(4): 145-152.
Li Z S, Li X L, Wan L Q. Effect of water-nitrogen coupling on oat production performance in horqin sandy land [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 145-152.

[28]周磊, 王璐, 赵宝平, 等. 北方农牧交错区不同播期和刈割期对燕麦饲草产量和品质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(10): 2355-2363.
Zhou L, Wang L, Zhao B P, et al. Effect of different sowing date and cutting time on yield and quality of forage oat in agro-pastoral ecotone of Northern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10): 2355-2363.

[29]唐建昭, 肖登攀, 王靖, 等. 不同生产目标条件的马铃薯水氮管理优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 108-116.
Tang J Z, Xiao D P, Wang J, et al. Optimizing irrigation and nitrogen management for potato production under multi-objective production conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 108-116.

[30]唐建昭, 肖登攀, 柏会子. 未来气候情景下农牧交错带不同灌溉水平马铃薯产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 103-112.
Tang J Z, Xiao D P, Bai H Z. Yield and water use efficiency of potato at different irrigation levels in agro-pastoral ecotone under future climate change [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of CSAE), 2020, 36(2): 103-112.

[31]Tang J Z, Wang J, Fang Q X, et al. Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China[J]. European Journal of Agronomy, 2018, 98: 82-94.

[32]肖相芬, 周川姣, 周顺利, 等. 燕麦氮吸收利用特性与适宜施氮量的定位研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4618-4626.
Xiao X F, Zhou C J, Zhou S L, et al. Characteristics of N absorption, utilization and optimum N-fertilizer rate based on a long-term fertilization experiment of oats [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(22): 4618-4626.

[33]张斌, 葛军勇, 杨万军, 等. 拔节期追氮对裸燕麦(*Avena nuda* L.)主栽品种生产性能与效益的影响[J]. 作物杂志, 2017(2): 81-87.
Zhang B, Ge J Y, Yang W J, et al. Effects of nitrogen topdressing at jointing stage on yield and profit of main varieties of naked oat (*Avena nuda* L.)[J]. Crops, 2017(2): 81-87.

[34]刘猛, 张新仕, 王桂荣, 等. 河北省主要杂粮种植成本与收益分析[J]. 河北农业科学, 2020, 24(1): 1-4.

Liu M, Zhang X S, Wang G R, et al. Analysis on planting cost and benefit of miscellaneous grain crops in Hebei Province [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2020, 24(1): 1-4,25.

Optimal combination of water and nitrogen for oat production under different production goals in the agro-pastoral ecotone

Tang Jianzhao[1], Bai Huizi[1], Zhang Xinjun[2], Cao Lixia[2], Huang Xinliang[3], Liu Jianfeng[1], Guo Fenghua[1], Zhou Haitao[2*]

(*1.Engineering Technology Research Center, Geographic Information Development and Application of Hebei, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang, 050011, China; 2.Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences, Zhangjiakou, 075000, China; 3.College of Geography Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China*)

Abstract: [Objective] The management of water and nitrogen for oat production in the northern agro-pastoral ecotone in China has often been inconsistent, with a focus mainly on maximizing yield. Optimizing irrigation and nitrogen inputs based on specific production goals is essential for developing a sustainable and efficient oat production system. [Method] In this study, 27 study sites were selected across the agro-pastoral ecotone. A field experiment examining the combined effects of water and nitrogen on oat yield was carried out in Zhangbei county, followed by calibration of the APSIM-Oat model using the experimental data. The fully calibrated model was then used to simulate various water and nitrogen coupling scenarios across the study region, allowing for recommendations on the optimal irrigation and nitrogen combinations tailored to different production goals. [Results] The combination of W90N150 (90 mm irrigation with 150 kg·hm^{-2} Nitrogen) or W120N150 (120 mm irrigation with 150 kg·hm^{-2} Nitrogen) produced the maximum oat yield ranging from 1780 to 3190 kg·hm^{-2}, with the lowest yields observed in the western APE. For maximum nitrogen use efficiency, the W30N30 (30 mm irrigation with 30 kg·hm^{-2} Nitrogen) combination was optimal, achieving an average efficiency of 33.7 kg·hm^{-2}·kg^{-1}, with the highest efficiency in the eastern region. The highest economic returns were achieved with the W60N150(60 mm irrigation with 150 kg·hm^{-2} Nitrogen) or W90N150(90 mm irrigation with 150 kg·hm^{-2} Nitrogen) combinations, ranged from 2940 to 6700 CNY·hm^{-2}, with the middle region showing the highest returns. [Conclusion] Compared to the inputs needed for maximum yield, reducing irrigation by 60~90 mm and nitrogen by 120 kg·hm^{-2} achieved maximum nitrogen use efficiency. Additionally, maintaining nitrogen levels while reducing irrigation by 30~60 mm maximized income.

Keywords: Oats, Yield, Irrigation, Nitrogen use efficiency, Income

(编辑:郭玥微)