

宁夏引黄灌区春小麦复种牧草模式的综合效益评价

刘露露¹, 刘根红¹, 买晓凤¹, 薛垠鑫¹, 张 倩¹, 杨世琦²

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要:通过麦后不同牧草种类种植效益及潜力研究,探索宁夏引黄灌区麦后复种的粮饲高效种植模式。在对宁夏引黄灌区 2010—2019 年 10 a 主要农业气象资料分析的基础上,对宁夏引黄灌区春小麦复种的 8 种牧草(苏丹草、小黑麦、冬牧 70 黑麦、燕麦、箭筈豌豆、草木犀、高粱、油菜)类型,运用层次分析法(AHP),选取经济效益、资源利用效率、地力提升 3 个二级指标,净收益、产投比等 12 个三级指标进行综合评价。结果表明:宁夏引黄灌区近 10 a 平均气温、最高气温、最低气温均值分别为 10.5℃、37.0℃、-19.0℃;年均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 4 269℃、3 569℃,增温速率为 $211.71^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$;日照时数呈显著下降趋势,日照时长均值是 2 933 h,倾向率为 $-10.36 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。运用层次分析法对灌区春小麦后复种的 8 种牧草综合分析表明:油菜在三级指标 $C_1 \sim C_8$ (实际产量占理论产量比值、水资源产出率、氮肥产出率、磷肥产出率、产量、净收益、产投比、粗蛋白量)中表现较高,其效益值分别为 0.35、0.35、0.10、0.10、1.35、1.20、0.80、0.30;箭筈豌豆在指标 $C_9 \sim C_{11}$ (有机质、碱解氮、有效磷)中效益值较高,分别为 0.20、0.09、3.26;草木犀在评价指标 C_{12} (pH 值的倒数)值为 0.05,效果较好。宁夏引黄灌区气候资源理论上能满足麦后复种两季短生育期作物生长需求;灌区麦后复种牧草综合效益最高的为油菜,其值为 7.16,其次为箭筈豌豆、草木犀、高粱、燕麦,适宜于宁夏引黄灌区大面积推广。

关键词:宁夏引黄灌区;春小麦;牧草;复种;综合效益

中图分类号:S344.3;S512.1⁺2 **文献标志码:**A

Comprehensive benefits evaluation of spring wheat multiple cropping forage grass in Ningxia Yellow River irrigation area

LIU Lulu¹, LIU Genhong¹, MAI Xiaofeng¹, XUE Yinxin¹, ZHANG Qian¹, YANG Shiqi²

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The experiment was conducted to study the planting benefit and potential of different forage species and explore the efficient grain and feed planting modes of multiple cropping after wheat planting in Ningxia Yellow River irrigation area. It was hoped that the study would provide theoretical support for the reform of multiple cropping in this area. The main agricultural meteorological data from 2010 to 2019 in the irrigation area of Ningxia were compiled. Using the analytic hierarchy process (AHP), three secondary indexes of the economic benefit, the resources use efficiency and soil fertility improvement and 12 of the third level indexes including net income and VCR were selected among 8 types of grass (Sudan grass, small 70 rye, oats, rye, winter arrow Kuo peas, sweet clover, sorghum, rape) for comprehensive evaluation in the spring wheat cropping irrigation area of Ningxia. The mean temperature, maximum temperature and minimum temperature in Ningxia Yellow River irrigation area in recent ten years were 10.5℃, 37.0℃ and -19.0℃, respectively. The average annual accumulated temperature $\geq 0^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$ was 4 269℃ and 3 569℃, respectively, and the warming rate was $211.71^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$. The number of sunshine hours showed a significant downward trend. The average length of sunshine hours was 2 933 h, and the trend rate was $-10.36 \text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$. The analytic hierarchy process (AHP) to spring wheat in the irrigation area of 8 kinds of

forage grass comprehensive analysis showed that rape in the three-level index $C_1 \sim C_8$ (the actual yield of theoretical yield ratio, water productivity, output rate of nitrogenous fertilizer, phosphate fertilizer production, output, net income, VCR, crude protein content) had high performance, and the benefit values were 0.35, 0.35, 0.10, 0.10, 1.35, 1.20, 0.80, 0.30. The benefit values of arrowhead pea in $C_9 \sim C_{11}$ (organic matter, alkali-hydrolyzed nitrogen and available phosphorus) were 0.20, 0.09 and 3.26, respectively. The value of C_{12} (reciprocal of pH) was 0.05, which showed a higher benefit. The climatic resources in Ningxia Yellow River irrigation area theoretically met the growth demand of crops with two short growth periods after multiple cropping of wheat. The highest comprehensive benefit of multi-planting forage after wheat was rape, with a value of 7.16 (followed by arrowhead pea, sweet clover, sorghum and oat), which was suitable for large-scale production in the irrigated area.

Keywords: Ningxia Yellow River irrigation area; spring wheat; forage grass; multiple cropping; comprehensive benefits

随着全球气候变暖,作物生长环境也发生不同程度变化,进而引起作物的种植结构变化^[1]。有关气候变化对农作物产量影响模拟显示,到 2050 年我国农业种植制度将因气候变暖而发生较大变化,并导致我国主要农作物的产量下降^[2]。宁夏作为黄河流域生态高质量发展的先行区,其农作制度发展趋于探索稳定粮食生产供求基础上的区域资源高效利用与持续发展模式^[3]。目前灌区种植业结构矛盾依然突出,集中表现为粮食、饲料、原料需求不平衡,如何解决这一问题,主栽作物玉米面积基本常年趋于稳定,水稻因水资源紧缺面积没有增加的可能,而小麦由于生长期较短,收获后具有 100 d 左右的作物生长时间,可以依据不同需求进行适宜作物的调配种植,因此麦后复种是一个潜力广阔的稳粮增效模式。

2012—2014 年,宁夏示范推广冬小麦复种青贮玉米、蔬菜、油料、粮食作物,增收效果显著^[4]。有学者研究表明,麦后复种饲料油菜不仅能解决当地冬季饲草紧缺问题,还可以增加地表植被覆盖,减少当地风沙气候。在油菜收割时留茬翻压可作为绿肥,实现增产增收、达到培肥地力的目的,而且复种牧草能减少矿物质流失和雨水对土地冲刷侵蚀,还能提升地力,增加翌年种植粮食作物产量^[5-7]。宁夏引黄灌区是我国重要的商品粮基地,也是重要的规模化养殖区^[8],对于牧草的需求相当紧迫。因此,筛选适宜于灌区春小麦后复种作物类型,不仅有利于地区资源高效利用,同时可有效满足地区对农产品的产业需求,是区域农作制度健康发展的必然趋势^[9]。

本研究基于宁夏引黄灌区 2010—2019 年气象资料,通过计算光、热、水、温等气象因子多年均值和变化趋势,研究气候变化对灌区春小麦后复种作物的潜力,同时,依据区域草畜产业发展需求,选取优质具有推广潜力的 8 种牧草,通过资源利用效益、经济效益以及复种在地力提升 3 个准则层、并涵盖

净收益、产投比等 12 个核心指标进行评价,能够更全面客观地评价农田生态系统,反映各系统的整体效益功能,研究春小麦复种不同牧草田间生长的适宜性及生长潜力,筛选适宜于灌区麦后复种的牧草作物种类(品种),解决区域种植业供需矛盾,并为区域多熟种植提供技术支撑和理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源

2010—2019 年逐日气象数据来源于中国气象数据网和《宁夏统计年鉴》^[10]。主要包括宁夏引黄灌区 6 个气象站,即惠农(东经 106°46′,北纬 39°13′)、陶乐(东经 106°42′,北纬 38°48′)、银川(东经 106°12′,北纬 38°28′)、吴忠(东经 106°11′,北纬 37°59′)、中卫(东经 105°11′,北纬 37°32′)、中宁(东经 105°41′,北纬 37°29′)。

1.2 试验地概况

试验在银川平吉堡进行,该地位于东经 106°12′,北纬 38°28′,海拔为 1 116 m,试验地属于大陆性干旱气候。2019 年试验地平均气温 17.5℃,平均地表温度 14.1℃,全年降水量 145.5 mm,年蒸发量 1 250 mm,全年日照时数 2 658.4 h。试验地土壤类型为淡灰钙土,土壤质地为轻壤土,基础养分状况为有机质含量 12.28 g · kg⁻¹、全氮 1.40 g · kg⁻¹、碱解氮 99 mg · kg⁻¹、有效磷 11.40 mg · kg⁻¹、速效钾 135.7 mg · kg⁻¹、pH 值 7.68。无霜期 150 d 左右,早霜在 9 月 20 日前后,晚霜在 5 月 10 日前后。引黄河水进行 3 级扬水自流灌溉,为典型的宁夏农区自然及农业条件。

1.3 试验材料

苏丹草、小黑麦(晋饲草 1 号)、冬牧 70 黑麦、燕麦(喜越)、箭筈豌豆、草木犀、高粱(绿巨人)、油菜(油杂 62)等 8 种牧草作物。

1.4 试验设计

试验运用随机区组设计,8 种牧草作物设 8 个小区,随机排列,每个处理 3 次重复,共 24 个小区,每个小区长 7 m,宽 5 m,每 4 行中间铺设一根滴灌带,肥料溶于水后用水泵施入小区,各重复之间间隔 1.0 m 保护行,试验地总面积 864 m²。

1.5 田间管理

小麦播前施控释掺混肥料(N-P₂O₅-K;30-12-6)400 kg·hm⁻²,小麦选用宁春 50 号于 3 月 1 日播种,7 月 12 日收获。小麦收获后灌水造墒,施入磷酸二铵 150 kg·hm⁻²,尿素 225 kg·hm⁻²,7 月 15 日条播牧草,10 月 15 日刈割收获。

1.6 测定项目和方法

1.6.1 气象数据 宁夏引黄灌区年蒸发量1 250 mm,全年降水量 204.2 mm,主要依靠黄河水灌溉,因此不分析降水量、蒸发量变化趋势。本研究选择气温(℃)、≥0℃和≥10℃积温(℃)、日照时数(h)作为影响作物生长的关键气象要素指标因素,主要计算其年平均值。对各气候要素的时间序列进行趋势分析时,采用最小二乘法拟合得到一元线性回归方程 $y = ax + b$ (x 取值分别为:2010,2011,⋯,2019),通过相关系数(r)的显著性检验,来判断回归系数(a)是否显著。 y 为气候要素; a 为线性趋势项,通常以 a 的 10 倍作为各气候要素每 10 年的变化率, $a > 0$ 表示直线递增, $a < 0$ 表示直线递减; x 为年份, b 为回归常数。

1.6.2 牧草产量 在小区中间选取长势均匀一致、面积为 1 m²的样方,人工用镰刀齐地面进行刈割,去除杂草后进行现场称重,记录样方鲜草产量并折

算成单位面积鲜草产量。置于电热恒温鼓风干燥箱中,在 105℃下杀青 30 min,然后维持在 75℃恒温下烘干,在电子天平上称干重。

1.6.3 牧草粗蛋白质含量 在牧草成熟期,选取具代表性的植株 5 株,烘干粉碎后采用浓 H₂SO₄-H₂O₂消煮,粗蛋白质含量测定采用凯氏定氮法。粗蛋白量(kg·666.7m⁻²)=单位面积产量×含水量(%)×粗蛋白含量(%)

1.6.4 土壤养分 牧草种植前、牧草收获后,采用等距 5 点取样法于试验小区采集 0~20 cm 土层的土壤样品,混合土样自然风干后研磨过筛,土壤养分测定方法统一采用鲍士旦^[11]的方法,测定指标有:土壤有机质(重铬酸钾法)、碱解氮(碱解扩散法)、有效磷(0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃法)、土壤 pH 值(用酸度计法进行测定,结果取倒数)。

1.6.5 综合效益分析 在宁夏建设黄河流域生态高质量发展先行区,国家粮食安全政策的背景下,以产量效益和生态效益为主,兼顾社会效益,以小麦复种饲草为主要研究内容,筛选体现综合效益的 12 个核心指标进行评价。采用加权综合方法,以层次分析法(AHP)^[12]建立综合评价指标体系,第一层是目标层(A),为综合效益;第二层是准则层(B),为影响综合效益的 3 个因子,包括资源利用、经济效益和地力提升,记为 B₁、B₂、B₃;第三层为评价层(C),有 12 个测定指标,包括实际产量占理论产量比值(C₁)、水资源产出率(C₂)、氮肥产出率(C₃)、磷肥产出率(C₄)、产量(C₅)、净收益(C₆)、产投比(C₇)、粗蛋白含量(C₈)、有机质(C₉)、碱解氮(C₁₀)、有效磷(C₁₁)、pH 值的倒数(C₁₂),见图 1。

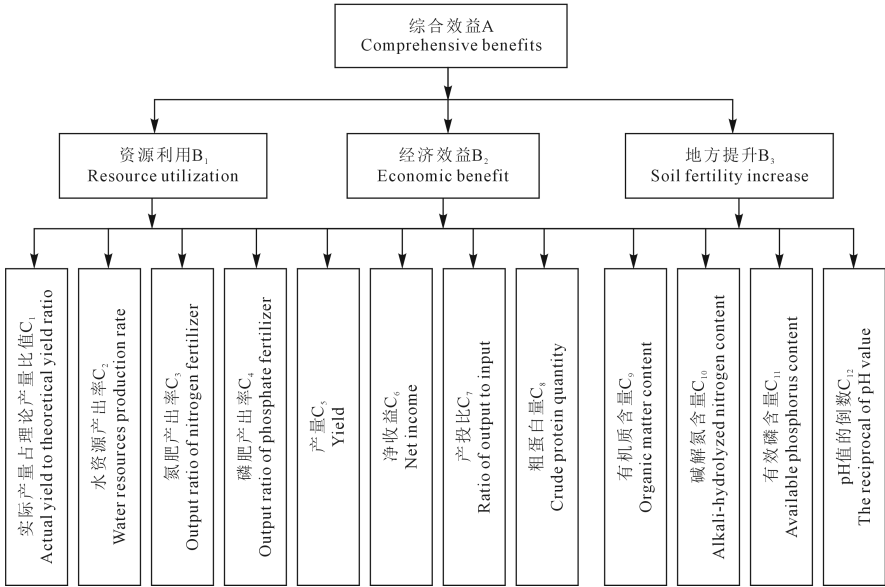


图 1 综合评价模型层次结构

Fig.1 Hierarchy of comprehensive evaluation model

实际占理论比率 $C_1(\%) = \text{实际产量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) / \text{光合生产潜力}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) \times 100\%$

水资源产出率 $C_2(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = \text{牧草产量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) / \text{生育期灌水总量}(\text{m}^3 \cdot 666.7 \text{ m}^{-2})$

氮肥产出率 $C_3(\%) = \text{牧草产量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) / \text{氮肥施用量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) \times 100\%$

磷肥产出率 $C_4(\%) = \text{牧草产量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) / \text{磷肥施用量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) \times 100\%$

净收益 $C_6(\text{元} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) = \text{牧草产量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) \times \text{产品单价}(\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}) - \text{投入资金}(\text{元} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2})$

产投比 $C_7 = \text{牧草产量}(\text{kg} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2}) \times \text{产品单价}(\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{投入资金}(\text{元} \cdot 666.7 \text{ m}^{-2})$

1.7 数据处理与分析

数据通过 Microsoft Excel 2010 进行计算和统计,采用 OringinPro 2018 软件绘制图表及进行线性分析和相关分析。

2 结果与分析

2.1 宁夏引黄灌区气候变化特征

宁夏引黄灌区近十年积温变化如图 2 所示,积温

倾向率为 $211.71^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,近十年积温增加 191°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温平均值是 $3\,569^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温平均值是 $4\,269^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。近十年宁夏引黄灌区无霜期呈上升趋势,平均 208 d,初霜日逐渐后移,多年平均初霜来临日期为 10 月 25 日,翌年 3 月初开始解冻。参照我国多熟制划定标准^[13](表 1),宁夏引黄灌区接近一年两熟制,热量条件可以满足两熟制种植要求,选择适宜的作物品种和种植方法可以实现麦后复种。

统计宁夏引黄灌区 6 个气象站 2010—2019 年温度数据可知,气温呈波动式上升,如图 3 所示。最高气温近十年平均值为 37.0°C ,倾向率为 $0.56^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,多年平均气温为 10.5°C ,倾向率为 $0.89^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,最低气温增幅最大,倾向率为 $3.14^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$,多年平均值为 -19.0°C ,由此可见最低气温的升高是引起平均气温增加的主要因素,最低气温的升高延长了作物生长时间。计算 2010—2019 年复种作物生长季内平均气温和地温,可知随着时间推进,温度呈下降趋势,7 月温度最高,平均气温 24.9°C ,地表温度 31.1°C ;10 月份温度最低,平均气温 15.4°C ,地表温度 12.6°C 。因此,理论上讲 7—10 月份可以满足作物生长需求。

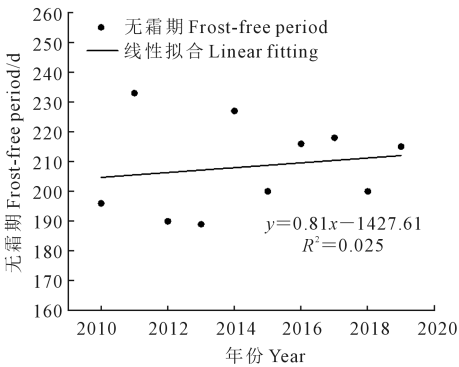
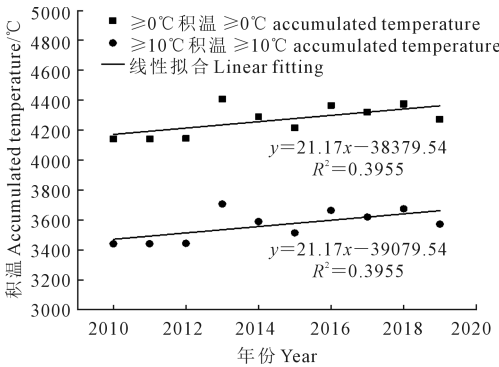


图 2 宁夏引黄灌区积温变化趋势

Fig.2 Variation trend of accumulated temperature in Ningxia Yellow River irrigation area

表 1 不同种植模式所需积温、无霜期			
Table 1 Accumulated temperature and frost-free period required for different planting patterns			
种植模式 Planting pattern	≥10°C 积温/°C ≥10°C accumulated temperature	≥0°C 积温/°C ≥0°C accumulated temperature	无霜期/d Frost-free period
一年两熟制 Yield two crops a year system	3600~5000	4000~5800	150~250
宁夏引黄灌区 Ningxia Yellow River irrigation area	3569	4269	208
小麦-牧草 Wheat-forage grass	3300	2800	>170

2010—2019 年宁夏引黄灌区降水量有上升趋势(图 4),拟合方程倾向率为 $53.51 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$,2013 年降水量最少(142 mm),2018 年降水量最多(249 mm)。近十年,全年降水量平均值是 204.2 mm,7—10 月份总降水量平均值 124.6 mm,占全年降水量 61%。试验研究区域自然降水量较少,主要依靠黄河水灌溉,故降水量不是影响复种的关键因子。

2.2 运用 AHP 法加权分析麦后复种模式综合效益

为了求出不同牧草种类综合效益,以便更进一步明确做出评判,对数据进行标准化处理,见表 2。

2.2.1 构建判断矩阵和计算权重 运用 1~9 比率标度法(表 3) 对各指标间重要性进行评价,建立判断矩阵,计算权重并做一致性检验,若 $CR<0.1$,即一致性检验是满意的,说明建立的判断矩阵是合理的,否则,需要对判断矩阵取值进行重新调整。表 4

为准则层(B)基于目标层(A)的得分,可以看出资源利用效率排名最重要权重为 0.65,其次是经济效益权重为 0.28,土地提升力的重要性相对较低,权重为 0.07。表 5、6、7 为评价层基于准则层的得分。由表 3 和表 5、6、7 可计算出各个评价层对目标层的总权重。

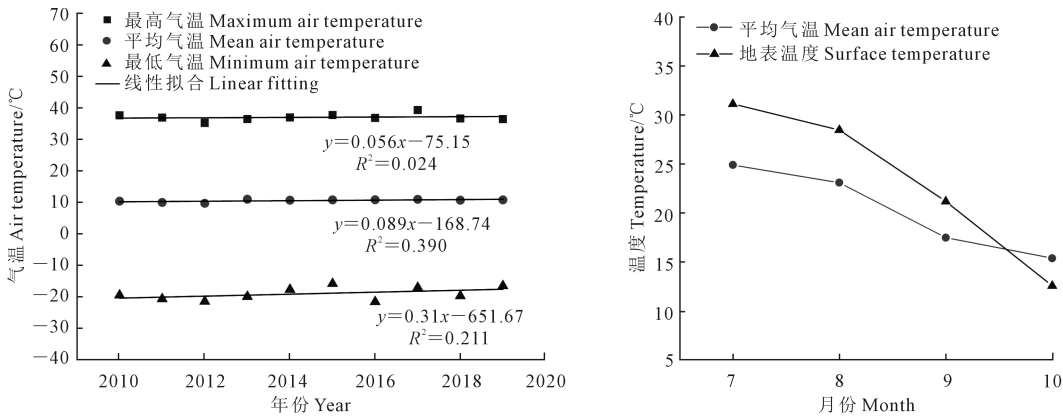


图 3 宁夏引黄灌区温度变化趋势

Fig.3 Variation trend of temperature in Ningxia Yellow River irrigation area

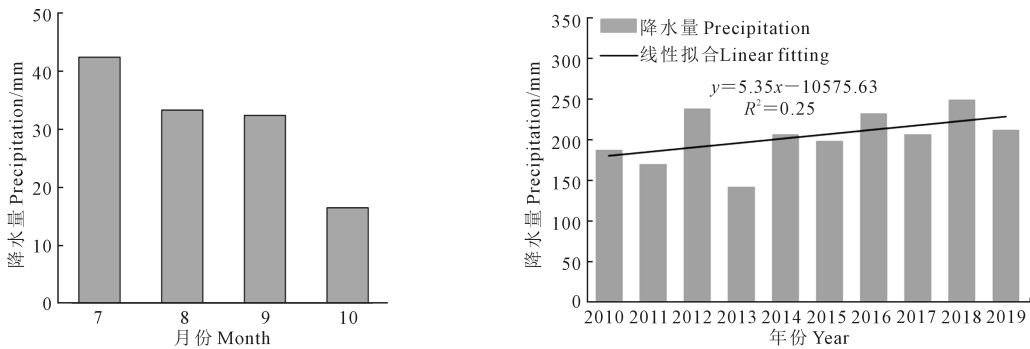


图 4 宁夏引黄灌区降水量变化趋势

Fig.4 Variation trend of precipitation in Ningxia Yellow River irrigation area

表 2 宁夏引黄灌区麦后复种 8 种牧草模式各指标标准化

Table 2 Standardization of indexes of eight forage grass models of multiple cropping after wheat in Ningxia Yellow River irrigation area													
序号 Serial No.	牧草 Forage grass	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
1	苏丹草 Sudan grass	4.4	3.3	2.4	2.4	3.3	3.2	3.2	1.0	1.0	1.0	5.0	1.4
2	小黑麦(晋饲草 1 号) Triticale (Jinsicao 1)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.8	6.2	1.5	2.3
3	冬牧 70 黑麦 Dongmu 70 rye	2.6	2.6	1.9	1.9	2.6	2.6	2.8	2.6	1.7	4.5	1.0	3.4
4	燕麦(喜越) Oats (Xiyue)	2.6	2.7	2.0	2.0	2.6	2.7	2.9	2.4	3.0	3.0	1.4	1.8
5	箭筈豌豆 Arrowhead pea	2.5	2.6	2.9	2.9	2.5	4.0	4.3	4.1	5.0	9.1	3.3	3.9
6	草木犀 Sweet clover	2.1	2.1	2.5	2.5	2.1	3.5	3.8	3.1	3.5	6.0	2.3	5.0
7	高粱(绿巨人) Sorghum (Lujuren)	4.4	4.4	3.0	3.0	4.4	4.4	4.5	3.4	1.0	3.0	1.1	2.3
8	油菜(油杂 62) Oilseed rape (Youza 62)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	3.3	5.0	2.4	3.9

表 3 1~9 比率标度法
Table 3 1~9 ratio scale method

标度(a_{ij}) Scale	相对重要程度 Relative importance
1	i 、 j 两元素同样重要 i and j are equally important
3	i 元素比 j 元素稍重要 Element i is slightly more important than element j
5	i 元素比 j 元素明显重要 Element i is obviously more important than element j
7	i 元素比 j 元素强烈重要 Element i is more important than element j
9	i 元素比 j 元素极端重要 Element i is extremely important than element j
2、4、6、8	两相邻程度的中间值 Intermediate value of two adjacent degrees
倒数 Reciprocal	$a_{ij}=1/a_{ji}$

表 4 准则层 (B₁₋₃) 相对于目标层 (A) 重要性的判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of the importance of criterion layer(B ₁₋₃) relative to the target layer (A)				
	B ₁	B ₂	B ₃	权重 Weight
B ₁	1	3	7	0.65
B ₂	1/3	1	5	0.28
B ₃	1/7	1/5	1	0.07

注 Note: $\lambda_{\max}=3.05$, $CI_1=0.02$, $RI_1=0.52$, $CR_1=0.04<0.10$.

表 5 评价层 (C₁₋₄) 相对于准则层 (B₁) 相对重要性的判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of relative importance of evaluation layer(C ₁₋₄) to criterion layer (B ₁)					
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	权重 Weight
C ₁	1	2	1/4	1/5	0.11
C ₂	1/2	1	1/2	1/6	0.10
C ₃	4	2	1	2	0.42
C ₄	5	5	1/2	1	0.37

注 Note: $\lambda_{\max}=4.33$, $CI_2=0.01$, $RI_2=0.9$, $CR_2=0.01<0.10$.

表 6 评价层 (C₅₋₈) 相对于准则层 (B₂) 相对重要性的判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of relative importance of evaluation layer(C ₅₋₈) to criterion layer (B ₂)					
	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	权重 Weight
C ₅	1	5	3	6	0.57
C ₆	1/5	1	1	3	0.20
C ₇	1/3	1	1	2	0.08
C ₈	1/6	1/3	1/2	1	0.08

注 Note: $\lambda_{\max}=4.08$, $CI_3=0.03$, $RI_3=0.9$, $CR_3=0.03<0.10$.

表 7 评价层 (C₉₋₁₂) 相对于准则层 (B₃) 相对重要性的判断矩阵

Table 7 Judgment matrix of relative importance of evaluation layer(C ₉₋₁₂) to criterion layer (B ₃)					
	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	权重 Weight
C ₉	1	5	3	4	0.54
C ₁₀	1/5	1	2	2	0.21
C ₁₁	1/3	1/2	1	2	0.16
C ₁₂	1/4	1/2	1/2	1	0.09

注 Note: $\lambda_{\max}=4.18$, $CI_4=0.06$, $RI_4=0.9$, $CR_4=0.07<0.10$.

各个评价层 (C) 对目标层 (A), 即总权重的计算方法是 $C_1'=B_1\times C_1$, $C_2'=B_1\times C_2$, $C_3'=B_1\times C_3$, $C_4'=B_1\times C_4$, $C_5'=B_2\times C_5$, $C_6'=B_2\times C_6$, $C_7'=B_2\times C_7$, $C_8'=B_2\times C_8$, $C_9'=B_3\times C_9$, $C_{10}'=B_3\times C_{10}$, $C_{11}'=B_3\times C_{11}$, $C_{12}'=B_3\times C_{12}$ 。计算结果为: $W=\{0.07;0.07;0.02;0.02;0.27;0.24;0.16;0.06;0.04;0.01;0.01;0.01\}$ 。

2.2.2 麦后复种牧草的综合评价结果 将表 2 中标准化处理后的各项指标乘以相应总权重, 计算结果见表 8。评价层 (C) 即 12 项评价指标中实际产量占理论产量比值 (C₁) 和水资源产出率 (C₂) 最高的模式是麦后复种油菜, 计算结果均为 0.35; 氮肥产出率 (C₃) 和磷肥产出率 (C₄) 最高的模式是麦后复种油菜, 计算结果均为 0.10; 在产量 (C₅)、净收益 (C₆)、产投比 (C₇)、粗蛋白量 (C₈) 4 个指标中麦后复种油菜的效益值最高, 分别是 1.35、1.20、0.80、0.30; 在有机质 (C₉)、碱解氮 (C₁₀)、有效磷 (C₁₁) 这 3 个测量指标中, 麦后复种箭筈碗豆效益值最高, 分别是 0.20、0.09、3.26; pH 值的倒数 (C₁₂) 效益值最高的复种模式是麦后复种草木犀, 其效益值为 0.05。

利用表 8 数据对 8 种复种模式进行综合评价 (表 9)。准则层 (B) 中资源利用 (B₁) 最高的复种模式是麦后复种油菜, 综合得分是 0.90, 其次是复种高粱和苏丹草, 效益值分别为 0.74、0.64; 经济效益 (B₂) 最高的复种模式是麦后复种油菜 3.65, 其次是复种高粱和箭筈碗豆 3.16、2.57。地力提升 (B₃) 效果最好的复种模式是麦后复种箭筈碗豆 3.59, 其次是复种油菜和草木犀 2.61、2.55。目标层 (A) 即综合效益是麦后复种油菜模式 (7.16)>复种箭筈碗豆 (6.64)>复种草木犀 (5.14)>复种高粱 (5.08)>复种燕麦 (4.03)>复种冬牧 70 黑麦 (3.52)>复种苏丹草 (2.98)>复种小黑麦 (2.59), 由此可以发现在春小麦复种模式中, 油菜的综合效益较高, 值得推广和种植。黑麦草在春小麦复种模式中综合效益较差。

张学艺等^[14]研究表明,在宁夏引黄灌区适宜种植黑麦草的模式是玉米-冬牧 70-插秧稻,其次是水稻-冬牧 70-插秧稻复种模式。

3 讨 论

3.1 气候变暖对宁夏引黄灌区种植结构的影响

在全球气候变暖大背景下,光能、热能和水分等农业气候资源发生了明显变化,进而引起作物的种植结构变化,对农业会造成一定影响^[15]。冬小麦的种植界线北移西扩,无霜期延长,种植制度由套

种转向复种两熟制^[16]。近年来,宁夏小麦种植面积与产量均呈下滑趋势,农民生产积极性不高,种植面积已由 2010 年 21.8 万 hm²减小到 2019 年 12.8 万 hm²;小麦总产量从 2010 年 70.3 万吨下降到 2019 年 41.6 万吨。单位面积产量几乎没有变化,2010 年是 3 327 kg · hm⁻²,2019 年是 3 233 kg · hm⁻²,小麦产量无法满足加工生产所需。青饲料种植面积从 2010 年 6.7 万 hm²增加到 2019 年 9.0 万 hm²。引黄灌区应充分利用独特的气候资源,调整种植结构,稳定增加小麦面积,提高复种指数,提高

表 8 宁夏引黄灌区麦后复种 8 种牧草种植模式综合效益的贡献值
Table 8 Contribution value of comprehensive benefits of eight forage grass planted after wheat in Ningxia Yellow River irrigation area

序号 Serial No.	牧草 Forage grass	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
1	苏丹草 Sudan grass	0.31	0.23	0.05	0.05	0.89	0.77	0.51	0.06	0.04	0.01	0.05	0.01
2	小黑麦(晋饲草 1 号) Triticale (Jinsicao 1)	0.07	0.07	0.02	0.02	0.27	0.24	0.16	0.07	0.07	0.06	1.52	0.02
3	冬牧 70 黑麦 Dongmu 70 rye	0.18	0.18	0.04	0.04	0.69	0.63	0.45	0.16	0.07	0.05	1.00	0.03
4	燕麦(喜越) Oats (Xiyue)	0.18	0.19	0.04	0.04	0.71	0.65	0.47	0.15	0.12	0.03	1.43	0.02
5	箭筈豌豆 Arrowhead pea	0.18	0.18	0.06	0.06	0.68	0.96	0.68	0.25	0.20	0.09	3.26	0.04
6	草木犀 Sweet clover	0.15	0.15	0.05	0.05	0.56	0.84	0.61	0.18	0.14	0.06	2.30	0.05
7	高粱(绿巨人) Sorghum (Lujuren)	0.31	0.31	0.06	0.06	1.18	1.06	0.72	0.20	0.04	0.03	1.09	0.02
8	油菜(油杂 62) Oilseed rape (Youza 62)	0.35	0.35	0.10	0.10	1.35	1.20	0.80	0.30	0.13	0.05	2.39	0.04

表 9 宁夏引黄灌区麦后复种八种牧草种植模式综合评价结果
Table 9 Comprehensive evaluation results of planting patterns of eight kinds of forage grass planted after wheat planting in Ningxia Yellow River irrigation area

序号 Serial No.	牧草 Forage grass	资源利用 B ₁ Resource utilization	经济效益 B ₂ Economic benefit	地力提升 B ₃ Soil fertility increase	综合效益 A Comprehensive benefits
1	油菜(油杂 62) Oilseed rape (Youza 62)	0.90	3.65	2.61	7.16
2	箭筈豌豆 Arrowhead pea	0.48	2.57	3.59	6.64
3	草木犀 Sweet clover	0.40	2.19	2.55	5.14
4	高粱(绿巨人) Sorghum (Lujuren)	0.74	3.16	1.18	5.08
5	燕麦(喜越) Oats (Xiyue)	0.45	1.98	1.60	4.03
6	冬牧 70 黑麦 Dongmu 70 rye	0.44	1.93	1.15	3.52
7	苏丹草 Sudan grass	0.64	2.23	0.11	2.98
8	小黑麦(晋饲草 1 号) Triticale (Jinsicao 1)	0.18	0.74	1.67	2.59

单产,满足区域口粮需求,增加农民收入。因地制宜发展以粮食为中心的多熟模式(粮-粮、粮-油、粮-菜、粮-饲等)促进农民经济发展,体现生物多样性原则,完善引黄灌区的种植制度^[17]。

本试验在宁夏引黄灌区研究示范麦后复种牧草模式,其一方面可以通过植物光合作用将 CO_2 以碳水化合物的形式固定在生物体中;另一方面,以少免耕等保护性耕作的方式种植牧草,降低了农田碳排放,这些措施对减少温室气体浓度,减缓全球气候变暖有重要意义^[18]。宁夏引黄灌区近十年无霜期呈上升趋势,平均 208 d,初霜日逐渐后移,多年平均初霜来临日期为 10 月 25 日,翌年 3 月初开始解冻,气候的变化有利于春小麦播种期提前,生长发育速度加快,全生育期缩短,利用剩余的光、温、水、气、肥等自然资源复种一季作物,可以实现增产增效的目的。引黄灌区 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温常年值是 $4\,269^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温常年值是 $3\,569^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$, 积温也满足两熟制的要求,种植业逐渐走出一季有余、两季不足的困境。平均最高气温、平均气温、最低气温分别以 $0.56^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.89^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $3.14^\circ\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率上升,降水量以 $53.51\text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率增加,引黄灌区暖湿化较为明显,同姜萍等^[19] 研究结果一致,中国增温趋势自东南向西北递增,全年增暖在北方最为显著,除黄土高原农业区年降水量有不显著减少趋势外,其余各农业区年降水量呈现增势。宁夏引黄灌区多年平均日照时数(2 933 h)高于西北地区平均值(2 765 h),日照时数变化趋势同肖风劲等^[20] 研究一致,呈逐年下降趋势,宁夏引黄灌区下降速率较小,为 $-10.36\text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$,西北地区以 $-20.9\text{ h} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率下降。本次研究也发现“蒸发悖论”现象,宁夏引黄灌区蒸发量以 $-138.28\text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率下降,同 Lin 等^[21] 研究结果一致,在全球气温增加的情况下,很多地区蒸发量却呈现显著下降趋势。全球变暖在给农业生产带来福音的同时,也产生了负面效应。张卫建等^[22] 总结发现温度升高 1.5°C 对我国水稻生产的潜在影响正负参半,并取决于具体的稻作季节和地区。刘远等^[23] 研究发现,升温增强了小麦土壤酶活性和微生物生命活动,导致土壤有机质分解速率加快、土壤肥力不断降低。宁夏引黄灌区近十年最低气温上升趋势明显,虽然极端低温造成农业损失事件相对较少,但是这更加容易引发极端高温现象的出现,气温升高使得土壤水分蒸散加强,带动盐分上移,加重了土壤盐渍化,所以,应趋利避害地调整灌区的种植结构。

种植结构的调整主要受自然因素和社会经济因素两个方面的共同影响,社会经济条件是种植结构调整的主要驱动因素,气候条件则是种植结构调整的重要制约因素^[24-26]。张强等^[27] 研究认为,气候变暖使喜温作物和越冬作物种植面积扩大,多熟制作物向北推移,复种指数提高。姚玉璧等^[28] 发现春播作物播种期提前、秋播作物播种期推迟,有限生长习性作物生长季缩短,无限生长习性作物生长季延长。张秀云等^[29] 研究得出气候变暖导致西北农作物光合酶活性降低,呼吸强度增强,净光合积累减少。车向军等^[30] 研究得出挖掘气候增产潜力、充分利用气候资源有利于提高产量和经济效益。Yang 等^[31] 研究发现,气候变暖引起水稻淀粉理化性质的变化,提高了粮食作物品质。刘玉兰等^[32] 得出气候变暖为高产品种的引进创造了条件,使玉米单产变率减小,保证了玉米的高产稳产。大量研究表明,全球气候变暖给农业生产带来积极影响,也带来了负面影响,因此在实践中应趋利避害调整种植结构,提高对气候变化的应变能力^[33]。

3.2 麦后复种牧草对引黄灌区综合效益的影响

复种是一种集约化程度较高的种植方式,可以充分利用气候资源与土地资源,提高单位耕地面积产量和总量,近年来被广泛应用于引黄灌区^[34],影响着物质循环、生态环境、土壤理化性质的变化以及人民饮食结构,对推动中国农业发展起着巨大的作用^[35]。春小麦复种牧草的综合效益由资源利用率、经济效益、地力提升 3 个主要影响因素构成。就资源利用率而言,复种调整了单一种植结构,充分利用自然资源和氮磷肥,降低农药化肥对环境的污染^[36]。杨滨娟等^[37] 研究表明,水旱复种轮作模式较冬闲连作模式,水分利用率、土地利用率以及周年光能利用率等方面均有提高;刘志辉等^[38] 研究发现,不同热量条件下品种搭配模式周年产量与资源生产效率影响显著。本课题组研究发现^[39],麦后复种青贮作物和蔬菜提高了对土壤氮磷吸收量,对照传统小麦/玉米氮磷流失量降低 42%~56.8%。本次试验测定实际产量占理论产量比值、水资源产出率、氮肥产出率、磷肥产出率 4 个评价指标,加权计算后发现小麦-油菜对资源利用最高,是小麦-小黑麦的 5 倍,小麦-高粱、苏丹草、豌豆、燕麦、冬牧 70 黑麦和草木犀分别是资源利用率最低复种模式小麦-小黑麦的 2.7、2.22、4.1、2.5、2.4、3.6 倍,因此,可以发现复种不同牧草对资源的利用存在差异。

复种牧草实现了种粮又种草、养地又养畜,以最小的资源投入获得较大的效益。刘超等^[40] 试验

结果表明,麦后复种苜蓿、燕麦草、冬牧草等粮饲模式,经济效益高于传统的麦套玉米和单种玉米模式。赵亚慧^[41]研究得出在宁夏引黄灌区,选择复种冬小麦—青贮模式较为理想,是对土壤污染较低且生态效益、经济效益较好的种植模式。李建忠等^[42]试验发现,与单种一季小麦模式相比,麦前复种毛叶苕子技术模式收益率增加 94.6%。该研究经济效益涵盖产量、净收益、产投比以及粗蛋白量 4 个方面,经济效益排序为麦后复种油菜>高粱>箭筈豌豆>苏丹草>草木犀>燕麦>冬牧 70 黑麦>小黑麦。同张俊丽等^[43]研究一致,牧草种植实现了机械化,呈现出投入成本较少,但效益好的特点,鲜草产量为燕麦>箭筈豌豆>糜子>黑麦草>冬牧 70 黑麦。

牧草做绿肥对于改良土壤、培肥地力有着重要的作用,是重要的有机肥料资源。刘祁峰等^[44]针对西北地区耕地存在“旱”与“薄”的现状,利用秋闲田种植、翻压豆科绿肥,通过 2~3 a 试验,验证了绿肥还田有增加土壤有机质、氮、磷、钾养分含量的效果,并筛选出适宜当地气候条件和耕作制度的绿肥品种箭筈豌豆和毛苕子。李文广等^[45]研究发现,牧草翻压做绿肥还能提高土壤酶活性,增加微生物多样性,提升土壤养分含量,对下季春小麦产量有明显提升作用。董艳等^[46]研究认为,复种有利于增加土壤细菌、放线菌数量,降低真菌数量,提高土壤酶活性,也推进了黄河流域的绿色发展,促进了农产品的高质量发展,有利于生态保护。本文地力提升包括有机质、碱解氮、有效磷的含量以及 pH 值的倒数 4 个衡量指标,复种箭筈豌豆、油菜、草木犀地力提升效果最好,其次是复种小黑麦、燕麦、冬牧 70 黑麦、苏丹草,同赵冬雪等^[47]研究一致,草木犀比黑麦草固氮能力强,豆科作物在提高土壤有机质、氮磷含量方面有重要作用。

宁夏引黄灌区自然条件优越,种植、养殖等农业生产发展水平较高,是我国重要的畜牧产区^[48]。由于天然草场退化、沙化、盐碱化“三化”严重,以及长期连作、化肥的不合理使用等导致土壤肥力下降,草场产量降低,造成饲料短缺,尤其是冬季供需矛盾较为突出,严重影响了引黄灌区农业的可持续发展和农民增收^[49-50]。所以,为缓解引黄灌区冬春饲料严重短缺问题,麦后复种饲料油菜和玉米的种植面积在生产中也逐渐增大,充分利用光热、水、土等自然资源,因地制宜进行复种,不仅缓解了人地矛盾,提高了土地利用率,而且丰富了物种组成和多样性,提高了产量和种植的经济效益,对促进农业的可持续发展具有重要的意义^[51]。目前饲料的

种植主要在玉米和油菜上,研究较多集中在品种筛选和复种模式上,对复种牧草的综合效益评价的研究较少,本试验通过运用层次分析法(AHP),选取经济效益、资源利用效率、地力提升 3 个二级指标,净收益、产投比等 12 个三级指标对 8 种牧草模式进行综合评价,为复种牧草的推广应用提供理论基础。对促进宁夏环境科学的发展发挥了重大作用,还促进当地经济、社会、生态的和谐发展,具有明显的生态、社会、经济效益^[52]。

4 结 论

8 种复种牧草模式中春小麦—油菜综合效益最高,其次是春小麦—箭筈豌豆、草木犀、高粱、燕麦,这 5 种模式比较适宜宁夏引黄灌区的气候条件和耕作制度,值得推广种植。小黑麦在资源利用、经济效益方面评分最低,而苏丹草在地力提升方面表现最差,冬牧 70 黑麦复种模式综合效益评分较低,所以,这 3 种牧草不适宜在春小麦收获后种植。综合分析可见,宁夏引黄灌区气候条件能满足春小麦—牧草种植模式,选择适宜复种的饲料作物品种,一方面解决了家畜冬春季饲料不足的问题,增加了农民的收入,促进家庭养殖业的发展,而且显著改善种植小麦收益较低的问题,提高耕地利用率,增强土地生产能力,还可完善和发展粮—经—饲三元种植结构模式。另一方面有利于引黄灌区盐碱地绿色高效开发,促进乡村振兴,并增加冬春季地表覆盖度,具有重要的生态价值。同时对引黄灌区气候变化、挖掘生产潜力和调整种植结构提供了理论基础和实践依据。

参 考 文 献:

[1] 李祎君,王春乙.气候变化对我国农作物种植结构的影响[J].气候变化研究进展,2010,6(2):123-129.
LI Y J, WANG C Y. Impacts of climate change on crop planting structure in China[J]. Climate Change Research, 2010, 6(2): 123-129.
[2] 王馥棠.近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展[J].应用气象学报,2002,13(6):755-766.
WANG F T. Advances in climate warming impact research in China in recent ten years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(6): 755-766.
[3] 王秀荣,王琼,卢燕宇,等.基于气候背景的作物种植条件综合评价概念模型及其应用——以内蒙古巴彦淖尔河套灌区为例[J].中国生态农业学报,2020,28(11):1649-1660.
WANG X R, WANG Q, LU Y Y, et al. Conceptual model based on climate for comprehensive evaluation of crop planting conditions: a case study in Bayannur Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(11): 1649-1660.
[4] 杨金贵,王宏洁.灵武市冬麦复种油菜高效益栽培模式浅析[J].科

- 技视界, 2015, (31): 306-315.
- YANG J G, WANG H J. Analysis on high benefit cultivation mode of winter wheat multiple cropping oil sunflower in Lingwu[J]. Science & Technology Vision, 2015, (31): 306, 315.
- [5] 马致慧, 李惠霞, 何文寿. 不同施肥量对麦后复种饲料油菜养分吸收及产量的影响——以宁夏引黄灌区为例[J]. 湖南农业科学, 2020, (5): 26-30, 36.
- MA Z H, LI H X, HE W S. Effects of different fertilizer amounts on nutrient uptake and yield of post-wheat forage rape-taking the Yellow River irrigation district of Ningxia as an example[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020, (5): 26-30, 36.
- [6] 朱汉超. 牧草种植的可行性及种植模式[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2015, 31(12): 213.
- ZHU H C. Feasibility and planting pattern of herbage[J]. Chinese Abstracts of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2015, 31(12): 213.
- [7] 王旺年, 王宗凯, 汪波, 等. 饲料油菜与牧草混合冬播效应研究[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(3): 317-323.
- WANG W N, WANG Z K, WANG B, et al. Benefits of mixed cropping of forage rapeseed with other forage crops[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(3): 317-323.
- [8] 闫丽华, 王永宏, 赵健, 等. 早熟青贮玉米新品种中夏玉 4 号选育及复种栽培技术[J]. 宁夏农林科技, 2015, 56(12): 5-6.
- YAN L H, WANG Y H, ZHAO J, et al. Breeding and multiple cropping technology of early-maturing silage maize Zhongxiayu No. 4[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2015, 56(12): 5-6.
- [9] 谢庭生. 宁夏回族自治区耕地资源高效利用途径[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 178-184.
- XIE T S. Efficient utilization of cultivated land resources in Ningxia Huiautonomous region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 178-184.
- [10] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏统计年鉴——2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Statistics Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Ningxia investigation team of National Bureau of Statistics. Ningxia statistical yearbook-2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] 刘新宪, 朱道立. 选择与判断——AHP(层次分析法)决策[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990.
- LIU X X, ZHU D L. Selection and judgment AHP (analytic hierarchy process) decision [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 1990.
- [13] 刘巽浩. 中国的多熟种植[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1987.
- Liu X H. Multiple cropping in China[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 1987.
- [14] 张学艺, 韩颖娟, 马力文, 等. 冬牧 70 在宁夏灌区复种的适宜种植区划[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(4): 192-197.
- ZHANG X Y, HAN Y J, MA L W, et al. The wintergrazer-70 suitable planting regionalization of multiple cropping patterns in Ningxia irrigation area[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(4): 192-197.
- [15] 戴声佩, 李海亮, 刘海清, 等. 全球气候变暖背景下华南地区农业气候资源时空变化特征[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(1): 52-60.
- DAI S P, LI H L, LIU H Q, et al. The spatio-temporal change characteristics of agriculture climate resources in southern China under the background of global warming[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(1): 52-60.
- [16] YANG X G, CHEN F, LIN X M, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 208: 76-84.
- [17] 周立萍, 吴宏亮, 康建宏. 宁夏引黄灌区不同种植模式的经济效益分析[J]. 南方农业, 2019, 13(17): 99-101.
- ZHOU L P, WU H L, KANG J H. Economic benefit analysis of different planting patterns in Ningxia Yellow River irrigation area[J]. South China Agriculture, 2019, 13(17): 99-101.
- [18] 阮俊梅, 宋振伟, 王全辉, 等. 中国农田减缓气候变化的潜力与技术途径[J]. 中国农学通报, 2020, 36(5): 98-102.
- RUAN J M, SONG Z W, WANG Q H, et al. The potential and technological approaches of China's farmland to mitigate climate change[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(5): 98-102.
- [19] 姜萍, 潘新民, 曾雪莹. 中国不同农业区气温和降水时空演变格局分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 270-278.
- JIANG P, PAN X M, ZENG X Y. Temporal and spatial variation of temperature and precipitation in each agricultural sub-region of China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 270-278.
- [20] 肖风劲, 张旭光, 廖要明, 等. 中国日照时数时空变化特征及其影响分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 92-100.
- XIAO F J, ZHANG X G, LIAO Y M, et al. Sunshine duration in China: variation characteristics and its influence[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(20): 92-100.
- [21] LIN P F, HE Z B, DU J, et al. Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian mountains of China: historical trends and projected changes [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(7): 2980-2993.
- [22] 张卫建, 陈长青, 江瑜, 等. 气候变暖对我国水稻生产的综合影响及其应对策略[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 805-811.
- ZHANG W J, CHEN C Q, JIANG Y, et al. Comprehensive influence of climate warming on rice production and countermeasure for food security in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 805-811.
- [23] 刘远, 潘根兴, 张辉, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对麦田土壤呼吸和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1484-1491.
- LIU Y, PAN G X, ZHANG H, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil respiration and enzyme activity in a wheat field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1484-1491.
- [24] 卮军, 张洪程, 陆建飞. 江苏省水稻生产 30 年地域格局变化及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3446-3452.
- NAI J, ZHANG H C, LU J F. Regional pattern changes of rice production in thirty years and its influencing factors in Jiangsu province [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(16): 3446-3452.

[25] 黄季焜,牛先芳,智华勇,等.蔬菜生产和种植结构调整的影响因素分析[J].农业经济问题,2007,28(7):4-10.
HUANG J K, NIU X F, ZHI H Y, et al. The analysis of the factors impacting vegetable production and readjustment of planting structure [J]. Issues in Agricultural Economy, 2007, 28(7): 4-10.

[26] 邓振镛,张强,韩永翔,等.甘肃省农业种植结构影响因素及调整原则探讨[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):126-129.
DENG Z Y, ZHANG Q, HAN Y X, et al. A discussion on the main principles and impact factors in planting structure adjustment in Gansu[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 126-129.

[27] 张强,邓振镛,赵映东,等.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2008,28(3):1210-1218.
ZHANG Q, DENG Z Y, ZHAO Y D, et al. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1210-1218.

[28] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等.黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响[J].生态学报,2012,32(16):5154-5163.
YAO Y B, WANG R Y, YANG J H, et al. Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5154-5163.

[29] 张秀云,姚玉璧,杨金虎,等.中国西北气候变暖及其对农业的影响对策[J].生态环境学报,2017,26(9):1514-1520.
ZHANG X Y, YAO Y B, YANG J H, et al. Characteristic and countermeasures of climate warming and its impacts on agriculture in northwest China[J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26(9): 1514-1520.

[30] 车向军,任继帮,路学勤,等.黄土高原庆阳地区春玉米生育期对气候变化的响应[J].中国农学通报,2020,36(3):88-92.
CHE X J, REN J B, LU X Q, et al. Response of spring maize growth period to climate change inQingyang area of Loess Plateau [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(3): 88-92.

[31] YANG T T, TAN X M, HUANG S, et al. Effects of experimental warming on physicochemical properties of indica rice starch in a double rice cropping system [J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125981.

[32] 刘玉兰,张晓煜,刘娟,等.气候变暖对宁夏引黄灌区玉米生产的影响[J].玉米科学,2008,16(2):147-149.
LIU Y L, ZHANG X Y, LIU J, et al. Impact of climate warming on maize yield in irrigation area of Ningxia [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(2): 147-149.

[33] 孙丹平.稻田水旱复种轮作对作物生长、资源利用及土壤生态环境的影响[D].南昌:江西农业大学,2016.
SUN D P. Effects on crops growth, resource utilization and soil ecological environment under paddy-upland multiple cropping rotation systems[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016.

[34] 田德龙,李泽坤,徐冰,等.膜下滴灌对麦后复种西兰花生长及水分利用效率的影响[J].中国农村水利水电,2020,(12):77-79,87.
TIAN D L, LI Z K, XU B, et al. The effects of drip irrigation under film on growth and water use efficiency of post-wheat replanted broccoli[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, (12): 77-79, 87.

[35] 刘巽浩,陈阜,吴尧.多熟种植——中国农业的中流砥柱[J].作物杂志,2015,(6):1-9.
LIU X H, CHEN F, WU Y. Multiple cropping: the principal part of China's agriculture[J]. Crops, 2015, (6): 1-9.

[36] LIANG S, LI Y F, ZHANG X B, et al. Response of crop yield and nitrogen use efficiency for wheat-maize cropping system to future climate change in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 262: 310-321.

[37] 杨滨娟,孙丹平,张颖睿,等.长江中游地区水旱复种轮作模式资源利用率比较研究[J].中国生态农业学报,2018,26(8):1197-1205.
YANG B J, SUN D P, ZHANG Y R, et al. Comparison of resources use efficiencies among paddy-upland multi-crop rotation systems in the middle reaches of Yangtze River[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1197-1205.

[38] 刘志辉,潘高峰,陈文,等.品种搭配对湖北省玉米—晚稻复种产量及资源效率的影响[J].作物学报,2020,46(12):1945-1957.
LIU Z H, PAN G F, CHEN W, et al. Effects of varieties collocation between crop seasons on the yield and resource use efficiency of maize-late rice cropping in Hubei province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(12): 1945-1957.

[39] 刘根红,许强,乔娜,等.宁夏自灌区农作物氮磷低污染种植结构优化[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):140-146.
LIU G H, XU Q, QIAO N, et al. Cultivation structure optimization of crops with lownitrogen and phosphorus pollution in irrigated Yellow River region of Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 140-146.

[40] 刘超,廖允成.宁夏引黄灌区春小麦复种模式效益对比试验研究[J].宁夏农林科技,2018,59(4):12-14.
LIU C, LIAO Y C. Economic benefit comparison of multiple cropping patterns of spring wheat in Yellow Riverirrigation area, Ningxia[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, 59(4): 12-14.

[41] 赵亚慧.宁夏引黄灌区低污染种植模式研究[D].银川:宁夏大学,2012.
ZHAO Y H. Study on planting pattern of low pollution in Ningxia Yellow River irrigation area [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2012.

[42] 李建忠,周喜平,胡喜云,等.麦收前复种毛叶苕子技术模式的比较研究[J].安徽农业科学,2017,45(7):21,91.
LI J Z, ZHOU X P, HU X Y, et al. Comparative study on the technical pattern of broadcastingVicia villosa Roth before wheat harvesting [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(7): 21, 91.

[43] 张俊丽,于洋,岳彩娟.宁夏引黄灌区麦后复种牧草种植效益对比及分析[J].黑龙江畜牧兽医,2016,(22):191-193.
ZHANG J L, YU Y, YUE C J. Comparison and analysis of the benefit of multiple cropping forage after wheat in Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2016, (22): 191-193.

[44] 刘祁峰,毛应诚,晏斌.山丹县种植绿肥培肥耕地技术试验总结[J].农业科技与信息,2019,(20):36-37,40.
LIU Q F, MAO Y C, YAN B. Summary of planting green manure and improving arable land technology in Shandan county[J]. Information of Agricultural Science and Technology, 2019, (20): 36-37, 40.