

考虑饲草料质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法与应用

鹿海员^{1,2}, 王 军^{1,2}, 李和平^{1,2}, 郑和祥^{1,2}, 苗 平³

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 中国水利水电科学研究院
内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3. 鄂尔多斯市河湖保护中心, 鄂尔多斯 017000)

摘 要: 家庭牧场作为牧区的基本生产单元, 开展家庭牧场水土草畜平衡计算合理确定灌溉人工草地和牲畜饲养规模, 对促进水资源可持续利用和维护草地生态安全具有实际管理意义。该研究针对牧区具体管理单元水土草畜平衡计算方法缺乏的问题, 同时考虑了不同种类饲草料质量的差别, 提出了考虑饲草料质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法, 以内蒙古自治区鄂托克前旗典型家庭牧场为例, 计算结果表明家庭牧场现状灌溉人工草地和牲畜均处于轻度超载状态, 水资源超载率为 6.05%, 考虑饲草料质量前后牲畜超载率分别为 12.98%和 5.38%。针对现状平衡状况提出了调整种植结构和灌溉形式组合的 8 套优化调控方案, 经不同方案可供水量变化以及可承载的灌溉人工草地和牲畜饲养规模对比分析, 表明种植质量更高的饲草料、采用更节水的灌溉形式可明显提升水资源对灌溉人工草地和饲草资源对牲畜的承载能力, 为给家庭牧场水资源和天然草地更多的休养生息空间, 建议家庭牧场保持现有有人工草地面积不增加, 将紫花苜蓿灌溉形式调整为地下滴灌。将燕麦灌溉形式调整为滴灌时, 核减牲畜至 464 羊单位维持家庭牧场水土草畜平衡; 将固定式喷灌燕麦调整为滴灌玉米或地下滴灌紫花苜蓿, 虽计算的适宜牲畜高于现状牲畜饲养量, 但仍保持现有牲畜饲养规模。提出的计算方法可为牧区水土草畜平衡计算与管理提供一种新的思路。

关键词: 草畜平衡; 评价; 生态; 水土平衡; 饲草料质量; 家庭牧场

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212169

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-08-0249-10

鹿海员, 王军, 李和平, 等. 考虑饲草料质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法与应用[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 249-258. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212169 http://www.tcsae.org

LU Haiyuan, WANG Jun, LI Heping, et al. Calculation method and application of the tradeoff on water, land, forage, and livestock in family pasture considering forage quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(8): 249-258. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202212169 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国牧区面积占国土面积的 45.1%, 其中天然草原面积约占 60%左右, 是中国水源涵养、防风固沙、保护生物多样性等的主体生态功能区, 同时也是草原畜牧业发展的重要生产资料来源^[1-2]。中国牧区多以家庭为单位开展草地畜牧业生产经营, 家庭牧场是牧区的基本生产单元^[3], 随着牧区小型水利工程建设为发展人工草地提供了灌溉条件, 逐步探索出通过种植灌溉人工草地增加饲草料产量, 既提高了抗灾保畜能力又缓解了天然草地放牧压力^[4]。随着灌溉人工草地经济和生态效益显现, 在经济利益驱使下, 部分家庭牧场开垦天然草场扩大灌溉人工草地面积, 导致地下水过度开发超过水土资源承载能力, 造成地下水位下降, 草原沙化等生态环境问题^[5], 依据水土草资源条件确定合理的灌溉人工草地面积和牲畜饲养量, 达到水土草畜平衡发展是牧区自然资源合理开发利用

与保护的关键^[6], 以往进行水土平衡计算多以流域或县级行政单元为计算单元^[7-10], 进行区域性控制, 确定整个区域适宜的水资源开发利用量、灌溉人工草地面积、牲畜饲养量等水土草畜平衡调控阈值^[11-12], 确定全区域适宜的阈值后如何进行调控管理, 则需要从更小的区域或者从最基本的家庭牧场单元进行管理, 如何科学合理确定家庭牧场灌溉人工草地和牲畜饲养规模对合理开发利用水资源及保护草地生态安全具有实际管理意义^[3,13]。

随着牧区经济社会发展与牲畜饲养需求的增加, 牧区的草地也逐渐体现为“天然-人工”二元化, 一是天然草地, 二是人工种植的人工草地^[6]。人工草地通过人工选种、育种, 配合灌溉、施肥等农艺措施, 亩均产量约为天然草地的 10~20 倍^[14]。同时, 人工草地饲草料质量也高于天然草地, 中国主要种植的人工牧草品种有紫花苜蓿、青贮玉米、披碱草、燕麦、饲料玉米和青稞等, 紫花苜蓿、披碱草、燕麦、青稞等在粗蛋白含量上高于天然牧草^[15-18]; 青贮玉米虽在营养成分上不及其他牧草, 但经过青贮发酵, 有利于营养成分的吸收, 适口性好, 可增加牲畜的采食量^[19-20]; 籽粒玉米虽粗蛋白含量低, 但其能量高、适口性好、无氮浸出物含量高, 消化率可达 90%以上^[21]。各类人工饲草料品质各有优势, 但以往在进行草畜平衡计算时仅考虑各类饲草料产量, 而忽略

收稿日期: 2022-12-15 修订日期: 2023-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41901052); “科技兴蒙”重点专项项目(2021EEDSCXSQZD010); 内蒙古自治区水利科技项目(NSK2021-Z1); 内蒙古自然科学基金资助项目(2020MS05057)

作者简介: 鹿海员, 博士, 高级工程师, 研究方向为牧区水土草畜平衡研究。

Email: haiyuan_lu@126.com

了饲草料之间质量的差别^[5,22-26]。

本文针对牧区最基本的管理单元—家庭牧场，从水循环的角度提出家庭牧场的水土平衡计算思路与方法，在草畜平衡计算时考虑不同种类饲草料之间的质量差别，利用饲草料的总可消化营养物质折算为标准干草，通过水土平衡和草畜平衡联合计算，确定家庭牧场适宜的灌溉人工草地种植面积和牲畜饲养数量，开展现状水土草畜平衡评价并给出调控方案，以期对牧区水土草畜平衡计算与管理提供一种新的思路和技术支撑。

1 考虑饲草料质量的水土草畜平衡计算方法

1.1 计算思路

1.1.1 家庭牧场水土平衡计算思路

中国牧区基本分布在干旱、半干旱区，地表水资源匮乏，牧民居住分散，水资源开发利用以开采地下水为主，本文从地下水补给、径流、排泄水文循环过程入手，分析家庭牧场单元地下水的补给项与排泄项，计算家庭牧场的各项地下水补给量，提出家庭牧场可供水量确定方法、灌溉用水需求及人畜饮水需求进行水土平衡计算。

1.1.2 考虑饲草料质量草畜平衡计算思路

利用饲草料的总可消化营养物质评价各类饲草料的营养价值，选取禾本科牧草为主的温性草原牧草总可消化营养物质作为标准，将不同种类饲草料统一折算为标准干草；以 1 只质量 45 kg、日消耗 1.8 kg 标准干草的成年绵羊作为 1 个标准的羊单位^[27]，将其他牲畜折算为标准的羊单位后计算饲草需求，通过标准干草产量与需求进行草畜平衡分析计算。

1.1.3 水土草畜平衡计算思路

因水土平衡计算和草畜平衡计算过程中存在数据的交互，如灌溉人工草地面积不仅决定灌溉用水需求，也决定了人工饲草料产量，采用不同灌溉形式和灌水量将影响地下水灌溉回归补给等水循环过程，牲畜数量决定了饲草料需求以及饮水需求，天然草地除提供天然饲草料外还是降水入渗补给地下水的主要媒介，通过这些共用参数进行水土草畜平衡联立计算，确定家庭牧场适宜的灌溉人工草地种植和牲畜饲养规模。

1.1.4 水土草畜平衡评价与调控思路

通过实际灌溉人工草地种植面积和牲畜饲养数量与水土草畜平衡计算确定的适宜灌溉人工草地和牲畜饲养规模对比，分析家庭牧场水土资源和饲草资源的承载状况。当灌溉人工草地超载时，家庭牧场实际用水量大于可供水量，灌溉人工草地种植超过水土资源承载能力，可通过压缩灌溉面积、调整种植结构或采用更先进的节水灌溉方式合理压减用水需求；在考虑水资源对灌溉人工草地和牲畜的承载能力的同时，还需考虑灌溉人工草地和天然草地的产草量对牲畜的承载能力，当牲畜超载时为饲草资源超载，可通过压缩牲畜饲养规模、外购饲草料、调整饲草料种植结构等措施增加饲草料供给量或减少饲草料需求量；当灌溉人工草地和牲畜饲养量等于适宜规模时，说明水土草畜处于平衡状态；当灌溉人工草地和牲畜饲养量小于适宜规模时，灌溉人工草地和牲

畜饲养有适度的发展空间，但维持现状水平更有利于水源涵养与生态保护。考虑饲草料质量的家庭牧场水土草畜平衡计算思路见图 1。

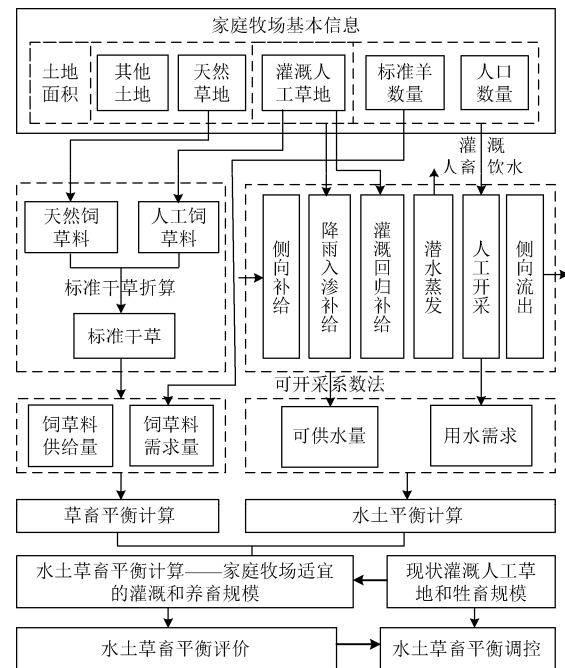


图 1 考虑饲草料质量家庭牧场水土草畜平衡计算思路
Fig.1 Calculation idea of water, land, forage and livestock balance in family pasture considering forage quality

1.2 水土平衡计算方法

1.2.1 可供水量确定方法

由于家庭牧场计算单元一般较小，基本以地下水作为水源，以家庭牧场所在的土地面积进行水循环过程分析，分析地下水的补给和排泄过程，地下水的补给来源主要包括降雨入渗补给、侧向补给和地下水灌溉形成的回灌补给，排泄量主要包括潜水蒸发、人工开采、侧向流出等，由于分析单元较小，地下水水位基本一致，认为地下水侧向流入量与侧向流出量一致，可不考虑这部分补给排泄量，以家庭牧场为单元的地下水补给量主要包括降雨入渗补给量和地下水灌溉形成的回灌补给量，计算式见式 (1) 和 (2)。

$$W_s = R \cdot \beta \quad (1)$$

$$R = 10^3 A \cdot P \cdot \alpha_p + \sum_i A_i \cdot m_i \cdot \alpha_i \quad (2)$$

式中 W_s 地下水可供水量， m^3 ； R 为家庭牧场地下水补给量， m^3 ； β 为可开采系数； A 为家庭牧场土地面积， km^2 ； P 为降水量， mm ，一般采用家庭牧场附近的气象站多年平均降水量监测数据； α_p 为降水的入渗补给系数，根据家庭牧场所在水文地质单元、土壤岩性条件及地下水埋深情况综合确定取值； A_i 为各类灌溉人工草地面积， hm^2 ； m_i 为各类人工草地灌溉定额， m^3/hm^2 ，灌溉定额查询各地行业用水定额中的推荐值或根据各类人工草地的灌溉试验确定； α_i 为灌溉入渗补给系数，可根据采用的灌溉形式、灌溉定额大小及地下水埋深综合确定。

1.2.2 需水确定方法

家庭牧场用水需求主要包括生活用水需求、人工草

地灌溉用水需求和牲畜饮水需求, 计算式见式(3):

$$W_R = I \cdot m_r + A_i \cdot m_i + L \cdot m_l \quad (3)$$

式中 W_R 为用水需求量, m^3 ; I 为家庭牧场的人口数; m_r 为人均用水定额, $\text{m}^3/\text{人}$; L 为拟确定的牲畜饲养数量, 标准羊单位; m_i 为牲畜饮水定额, $\text{m}^3/\text{羊单位}$ 。

1.2.3 水土平衡计算方法

按照用水需求与可供水量相等来寻求水资源对灌溉人工草地和牲畜饲养的最大支撑能力, 计算式见式(4)和(5):

$$W_S = W_R \quad (4)$$

$$(A \cdot P \cdot \alpha_p + \sum_i A_i \cdot m_i \cdot \alpha_i) \cdot \beta = A_i \cdot m_i + L \cdot m_l + I \cdot m_r \quad (5)$$

式中 A_i 和 L 为未知数, 是计算需要求解的变量。

1.3 草畜平衡计算方法

1.3.1 考虑饲草料质量的标准干草折算方法

选取以禾本科牧草为主的温性草原饲草作为标准干草, 以标准干草的总可消化养分为标准, 计算不同饲草料的标准干草折算系数, 将其他饲草料折算成统一标准的干草, 计算式见式(6)~(8):

$$y_{si} = y_i \cdot \eta_i \quad (6)$$

$$\eta_i = \frac{S_{\text{TDNi}}}{S_{\text{TDNg}}} \quad (7)$$

$$S_{\text{TDN}} = 81.38 + 0.36C_{\text{CP}} - 0.77C_{\text{ADF}} \quad (8)$$

式中 y_{si} 为各类草地标准干草折算量, kg/hm^2 ; y_i 为各类草地产草量, kg/hm^2 , 草地产草量可采用样方法进行测定, 取多个样方进行加权平均计算, 天然草地也可查询林草部门的草原监测数据; η_i 为标准干草折算系数; S_{TDN} 为总可消化养分, %; S_{TDNi} 为各类草地饲草料的总可消化养分, %; S_{TDNg} 为以禾本科牧草为主的温性草原饲草的总可消化养分, %; C_{CP} 为饲草料粗蛋白质量分数, %; C_{ADF} 为饲草料酸性洗涤纤维质量分数, %。

1.3.2 饲草料可供草量计算方法

将家庭牧草所有种类的饲草料折算为标准干草产量后, 根据人工草地和天然草地面积计算家庭牧场饲草料可利用量, 计算式见式(9):

$$F_S = \sum_i A_i \cdot y_{si} \cdot d_i + \sum_j A_j \cdot y_{sj} \cdot d_j \quad (9)$$

式中 F_S 为饲草料可利用量, kg ; d_i 人工饲草料的利用率, 各类人工饲草料利用率, 一般可取 90%~95%; d_j 为天然草地利用率, 不同天然草地类型草地利用率 5%~65%不等, 高寒草地荒漠类利用率较低, 热性草丛/灌草丛草地利用率可达到 65%, 不同草地合理利用率可查询草地普查数据。

1.3.3 饲草料需求量计算方法

根据牲畜饲养头数确定牲畜的饲养的饲草料需求, 按照牲畜饲养定额乘以牲畜饲养头数确定, 计算式见式(10):

$$F_R = L \cdot D \quad (10)$$

式中 F_R 为饲草料需求量, kg ; D 为牲畜饲养定额, 一般取值 1.8 $\text{kg}/(\text{d} \cdot \text{只})$, 按照一年 365 d 考虑, 即 657 $\text{kg}/\text{只}$ 。

1.3.4 考虑饲草料质量的草畜平衡计算方法

按照饲草料需求与饲草料可利用量相等来寻求饲

草资源对牲畜饲养的最大支撑能力, 计算式见式(11)和(12):

$$F_S = F_R \quad (11)$$

$$\sum_i A_i \cdot y_{si} \cdot d_i + \sum_j A_j \cdot y_{sj} \cdot d_j = L \cdot D \quad (12)$$

1.4 水土草畜平衡计算方法

上述方程(5)表示水土平衡, 方程(12)表示草畜平衡, 两个方程中均涉及灌溉人工草地面积和牲畜饲养数量的因变量, 联合求解计算, 确定在保障水土草畜平衡条件下灌溉人工草地和牲畜饲养的适宜规模。

1.5 水土草畜平衡评价方法

计算的灌溉人工草地和牲畜饲养的适宜规模为家庭牧场现状种植和饲养条件下可承载的最大规模, 通过计算结果与实际情况相比分析平衡状况。

1) 当实际灌溉人工草地面积和牲畜饲养量均超过可承载规模时, 为水土草畜不平衡, 水资源和草地资源均超载。

2) 当实际灌溉人工草地面积超过可承载规模, 牲畜饲养量不超过可承载规模时, 为水土不平衡, 水资源超载。

3) 当实际灌溉人工草地面积不超过可承载规模, 实际牲畜饲养量超过可承载规模时, 为草畜不平衡, 草地资源超载。

4) 当实际灌溉人工草地面积小于可承载规模时, 可结合政策要求, 适当增加种植面积, 若政策不允许新增种植面积, 需按照实际灌溉人工草地面积, 按照草畜平衡计算式(6)~(12)核定此种植条件下适宜的牲畜饲养规模, 重新进行草畜平衡评价。

2 应用实例

2.1 研究区概况

研究区域选择在中国内蒙古自治区鄂尔多斯市鄂托克前旗一典型家庭牧场, 从区域角度核算鄂托克前旗最大可承载灌溉面积为 3.38 万 hm^2 , 但现状区域内实际灌溉面积 5.67 万 hm^2 , 生产的粮食、饲草产品直接销售, 使本地水资源以虚拟水的形式超负荷输出, 尚未实现为养而种的农牧业生产模式^[5]。虽确定了区域可承载灌溉面积, 但如何开展实地进行管理仍存在难题, 哪些牧户已超过承载力需要退减, 哪些牧户目前的灌溉面积是合适的, 牧区以家庭牧场作为基本的管理单元, 如何简易方便的确定基本管理单元的适宜发展面积对管理更具有实际意义。典型家庭牧场地理坐标 38°10'32"N, 107°45'51"E, 详见图 2, 土地面积 295.10 hm^2 , 其中: 天然草场面积 273.33 hm^2 , 草地类型为温性荒漠草原类, 主要建群种为冷蒿+针茅, 优势种为隐子草、猪毛蒿、蒙古韭、二裂委陵菜等, 草层高度 5~20 cm; 灌溉人工草地 16.66 hm^2 , 其中滴灌玉米 3.33 hm^2 , 时针式喷灌紫花苜蓿 12.00 hm^2 , 固定式喷灌燕麦 1.33 hm^2 (2021 年之前种植紫花苜蓿); 饲养羊 410 只, 牛 12 头; 地下水埋深 3~5 m, 地下水水质良好, 可满足人畜饮水及灌溉用水水质要求。目前, 根据草畜平衡要求, 鄂托克前

旗天然草地 3 月 20 日—6 月 20 日天然草地禁牧, 牲畜利用人工饲草料舍饲; 6 月 20 日—10 月 15 日为暖季天然草地放牧; 10 月 15 日—3 月 20 日为冷季天然草地放牧+人工饲草补饲。

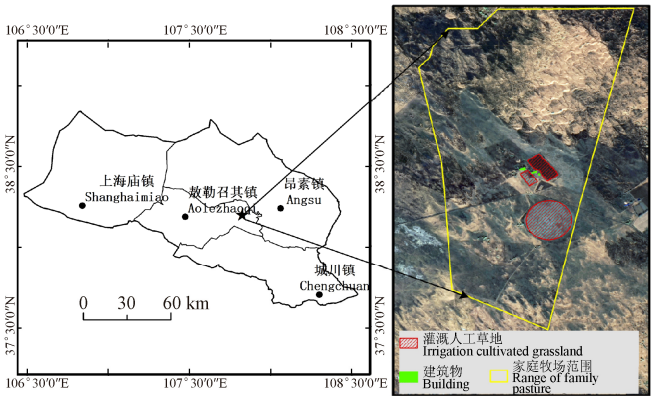


图 2 典型家庭牧场地理位置图
Fig.2 Geographic location of typical family pasture

2.2 计算参数确定及来源

2.2.1 可供水量计算参数

典型家庭牧场所在地下类型区为平原区, 属于毛乌素沙漠区三级水文地质分区, 土壤类型为沙壤土, 结合水文地质分区及土壤类型, 按照《鄂托克前旗水资源综合利用规划》(2020) 成果中地下水资源评价成果, 确定家庭牧场降水入渗补给系数为 0.12、地下水可开采系数为 0.7, 根据灌溉试验实际观测结果确定滴灌和喷灌的灌溉入渗补给系数分别为 0.03 和 0.05, 根据家庭牧场附近塔布陶勒盖区域站 2015—2021 年的观测数据, 确定家庭牧场平均降水量为 217 mm。

2.2.2 需水计算参数

家庭牧场用水需求主要包括灌溉人工草地灌溉用水、生活用水和牲畜饮水三类, 各类用水定额参照现状用水定额、内蒙古自治区《行业用水定额》(DB15/T 385—2020) 及灌溉试验数据确定, 详见表 1。

表 1 家庭牧场用水定额表
Table 1 Water consumption quota of family pasture

灌溉形式 Irrigation form	人工草地灌溉定额 Cultivated grassland irrigation quota/(m ³ ·hm ⁻²)			生活水定额 Residential water quota/(L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	牲畜饮水定额 Livestock water quota/(L·只 ⁻¹ ·d ⁻¹)
	紫花苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat	玉米 Maize		
地理式滴灌 Subsurface drip irrigation	3 150	-	-	80	8
滴灌 Drip irrigation	-	2 100	3 300		
时针式喷灌 Center-pivot irrigation	3 600	-	-		
固定式喷灌 Fixed spray irrigation	3 750	2 400	3 750		

2.2.3 标准干草折算计算参数

家庭牧场天然草地属于温性荒漠草原类, 草地产量

为牧场 5 个样点 5 个重复的样方加权平均实测数据, 也可查询鄂尔多斯市天然草地样地测产资料; 灌溉人工草地采用样方测产数据或实际调查数据, 本次采用实际测产数据; 标准干草折算所需各类饲草料的 CP 值、ADF 值和 TDN 值来源于《牧区水草畜平衡计算与评价技术规范》(T/CHES 60—2021); 饲草料产量及营养价值参数详见表 2。

表 2 家庭牧场饲草料产量及营养价值参数表
Table 2 Family pasture forage yield and nutritional value parameter

饲草料种类 Forage species	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	利用率 Utilization rate/%	粗蛋白 质量分数 Crude protein content/%	酸性洗涤纤维 质量分数 Acid detergent fiber content/%	总可消化 养分 Total digestible nutrients/%
标准干草 Standard forage	-	-	10.89	35.63	57.87
天然饲草 Nature forage	772.5	0.54	12.51	40.61	54.61
紫花苜蓿 Alfalfa	11250	0.95	20.15	30.89	64.85
燕麦 Oatgrass	7500	0.98	8.00	33.07	58.08
玉米 Maize	9750	0.95	9.88	4.54	81.44

2.2.4 牲畜饲养计算参数

标准羊单位折算按照《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T 635-2015) 中给定标准进行折算, 折算典型家庭牧场标准羊单位 470 只, 标准羊单位饲养定额为 1.8 kg/d。

2.3 现状种植条件水土草畜平衡分析

2.3.1 现状条件下适宜的人工草地和牲畜饲养规模

以现状灌溉人工草地利用结构为基础, 利用提出的考虑饲草料地质质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法, 计算地下水降雨入渗补给量为 7.68 万 m³, 井灌回归入渗补给量为 0.26 万 m³, 典型家庭牧场因天然草场面积较大, 地下水补给来源主要依靠降雨入渗补给, 虽人工草地灌溉水量较大, 但目前人工草地基本采用喷滴灌等节水灌溉形式, 形成的深层渗漏较少, 能通过灌溉入渗补给地下水的水量较小。计算地下水可开采量为 5.56 万 m³; 按照现状的牧场人口和灌溉面积计算, 灌溉人工草地灌溉用水量为 5.74 万 m³, 牲畜饮水量 0.13 万 m³, 居民生活水量 0.01 万 m³, 总用水量为 5.88 万 m³。与地下水可供水量相比, 现状可供水量与供水量存在一定的不平衡, 但差值不大。

现状家庭牧场饲料玉米种植面积 3.33 hm², 玉米籽粒产量 32.5 t, 紫花苜蓿种植面积 12.00 hm², 紫花苜蓿干草产量 135.0 t; 燕麦种植面积 1.33 hm², 燕麦干草产量 10.0 t; 天然草地面积 273.33 hm², 天然草地干草产量 211.1 t; 不考虑饲草料质量的干草产量为 388.6 t, 采用标准干草折算方法折算后, 饲草料产量为 406.2 t, 考虑饲草料质量前后各类饲草料产量对比见图 3。考虑饲草料质量后, 玉米和紫花苜蓿折算的标准干草量较实际产量有所提升, 燕麦基本保持不变, 天然草地有所下降, 总体标准干草量较实际产草量提升 17.6 t。虽灌溉人工草地种植面积较小, 仅占天然草地面积的 6.1%, 但不考虑饲草

料质量时饲草料产量占总饲草产量的 45.68%，考虑饲草料质量时占比提升至 50.96%，人工草地在经过人工培育后，不仅在产量上高于天然草地，在饲草料质量上也高于天然草地饲草产量。

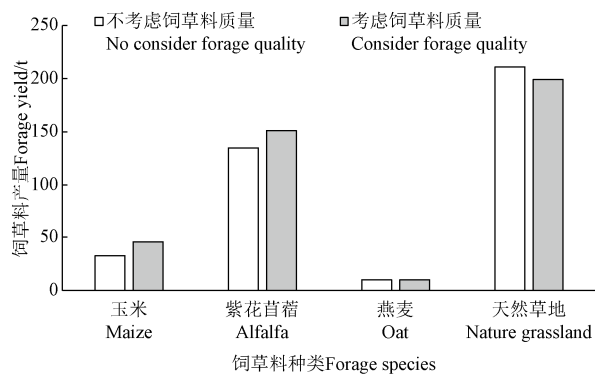


图 3 考虑饲草料质量前后饲草料产量对比

Fig.3 Comparison of forage yield before and after considering forage quality

因现状水资源开发利用量略超过水资源可供量，说明现状灌溉人工草地种植已超过水资源承载能力，需根据水资源承载能力适当压缩灌溉人工草地用水需求，利用水资源供需平衡方程式与草畜平衡方程式联立求解，计算典型牧场适宜的灌溉人工草地规模为 15.71 hm²，适宜的牲畜饲养规模（考虑饲草料质量）为 446 羊单位，适宜的灌溉人工草地面积较实际种植的灌溉人工草地少 0.95 hm²；如不考虑灌溉人工草地质量，适宜的灌溉人工草地规模也为 15.71 hm²，但适宜的牲畜饲养规模为 416 羊单位，较考虑饲草料质量时少 30 羊单位。家庭牧场实际、不考虑饲草料质量和考虑饲草料质量条件下灌溉人工草地和牲畜饲养量对比见表 3。

表 3 灌溉人工草地和牲畜现状规模与适宜规模对比

Table 3 Comparison of current irrigation cultivated grassland and livestock scale and suitable scale

类别 Category	人工草地规模 Cultivated grassland scale/hm ²			牲畜饲养量 livestock/sheep unit
	玉米 Maize	燕麦 Oat	紫花苜蓿 Alfalfa	
现状规模 Current scale	3.33	1.33	12.00	470
不考虑饲草料质量适宜规模 Scale of no considering forage quality	3.14	1.26	11.31	416
考虑饲草料质量适宜规模 Scale of considering forage quality	3.14	1.26	11.31	446

2. 3. 2 现状水土草畜平衡评价

通过现状水土草畜平衡计算结果分析，现状的用水量超过水资源可供量，在维持现状灌溉人工草地结构比例的前提下，实际灌溉人工草地种植超载 0.95 hm²，实际牲畜超载 54 羊单位。考虑饲草料质量后，可承载的灌溉人工草地面积不变，说明灌溉人工草地主要受水资源量控制；可承载的牲畜数量由 416 羊单位提升至 446 羊单位，在高质量人工饲草料影响下，考虑饲草料质量可提高牲畜饲养的承载力，家庭牧场牲畜承载力提升了 30 羊单位；因现状灌溉人工草地超载，在不考虑超载的情况下，不考虑饲草料质量时可承载牲畜为 431 羊单位，

考虑饲草料质量后可承载的牲畜为 464 羊单位，实际的牲畜饲养量为 470 羊单位，超过了牲畜可承载的范围，草畜也处于不平衡状态。现状水土和草畜均处于一个轻度超载的状态，水资源超载率为 6.05%；水土草畜平衡状态下，考虑饲草料质量牲畜超载率为 5.38%，不考虑饲草料质量牲畜超载 12.98%；现状种植条件下，考虑饲草料质量牲畜超载率为 1.29%，不考虑饲草料质量牲畜超载率为 9.05%；未来需要通过调整灌溉人工草地种植结构、灌溉方式等提升水资源承载力和饲草资源承载力或核减灌溉人工草地面积与牲畜饲养量。

2. 4 优化调控后水土草畜平衡分析

2. 4. 1 优化调控方案

目前鄂托克前旗灌溉人工草地已超过水资源承载能力，部分地区开始推行喷灌改滴灌、控制玉米灌溉面积、退耕还林（草）、限水灌溉等降低灌溉用水量措施，参考鄂托克前旗目前已采用的调控措施，按照调整灌溉形式、调整种植结构及其组合方案，共构建优化调整方案 8 套（见图 4）。方案 1：在维持现状种植结构的基础上，将固定式喷灌燕麦改为滴灌燕麦；方案 2：在维持现状种植结构的基础上，将固定式喷灌燕麦改为滴灌燕麦，将时针式喷灌紫花苜蓿改为地下滴灌紫花苜蓿；方案 3：在维持现状灌溉形式的基础上，调整种植结构，将现有燕麦改为种植紫花苜蓿；方案 4：维持现状灌溉形式的基础上，将现有燕麦调整为玉米；方案 5：将固定式喷灌燕麦调整为地下滴灌紫花苜蓿；方案 6：将固定式喷灌燕麦调整为滴灌玉米；方案 7：将固定式喷灌燕麦调整为滴灌玉米，将时针式喷灌紫花苜蓿调整为地下滴灌紫花苜蓿；方案 8：将固定式喷灌燕麦调整为地下滴灌紫花苜蓿，将时针式喷灌紫花苜蓿调整为地下滴灌紫花苜蓿。

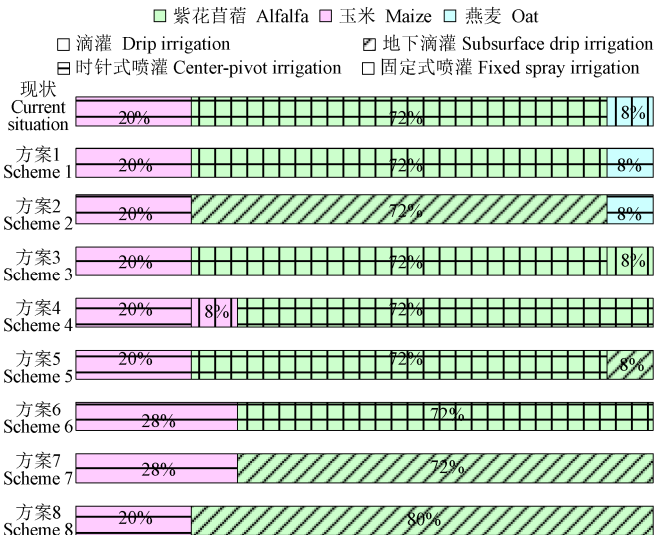


图 4 优化调控方案设计

Fig.4 Optimal adjustment scheme design

2. 4. 2 适宜的人工草地和牲畜饲养规模

利用提出的考虑饲草料地质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法，计算不同优化调整方案下可供水量变化、适宜的灌溉人工草地规模以及考虑饲草料质量与不

考虑饲草料质量条件下适宜的牲畜饲养规模,计算结果详见表 4,从计算结果中可以看出,方案 2、方案 7 和方案 8 与家庭牧场现状情况相比,可承载的灌溉人工草地面积大于现状面积,可承载的牲畜饲养头数大于现状牲畜饲养量,分析这 3 个方案均包含将时针式紫花苜蓿调整为地下滴灌紫花苜蓿,地下滴灌与时针式喷灌和固定式喷灌相比,滴灌灌水器埋于地下 15~20 cm,灌溉水分直达作物根部,降低了飘移损失和部分无效土壤蒸发损失,提高了灌溉水利用效率,但同时也降低了渗漏水量,通过灌溉补给地下水量也有部分减少。方案 1 可承载的灌溉人工草地面积虽小于现状的灌溉面积,但比现状种植条件下可承载的灌溉人工草地面积有适度提升,适宜牲畜饲养量稍有提升但仍无法承载现状的牲畜饲养数量。方案 3~6,紫花苜蓿仍采用中心支轴式喷灌的灌溉形式,将燕麦调整为玉米或者紫花苜蓿,因玉米和紫花苜蓿需水量大于燕麦,导致可承载的灌溉人工草地面积较现状种植条件下可承载的灌溉面积降低了 0.25~0.44 hm²,在可承载的灌溉人工草地面积减少

的情况下,不考虑饲草料质量时可承载的牲畜数量与现状种植条件下基本持平,用更少的灌溉面积可以支撑同样的牲畜饲养规模;而考虑饲草料质量时,因燕麦与玉米和紫花苜蓿相比,燕麦总可消化养分与标准干草基本一致,但玉米和紫花苜蓿的总可消化养分分别为标准干草的 1.4 和 1.2 倍,所以可承载的牲畜饲养量较现状种植条件下有所增多,通过将燕麦调整为玉米和紫花苜蓿可提升牲畜的承载能力;根据牧民实际种植情况,燕麦一般用于紫花苜蓿倒茬,相比燕麦种植牧民更倾向于种植紫花苜蓿和玉米,说明考虑饲草料质量的草畜平衡分析更符合实际情况。对比方案 3 和方案 4,分别将燕麦调整为紫花苜蓿和玉米,保持灌溉形式不变,可承载的灌溉人工草地面积一致,但不考虑饲草料质量时,可承载的牲畜数量方案 3 高于方案 4,考虑饲草料质量时,可承载的牲畜数量方案 4 高于方案 3,说明种植作物选择上,考虑饲草料质量时,玉米优于紫花苜蓿,紫花苜蓿优于燕麦;不考虑饲草料质量时,紫花苜蓿优于玉米,玉米优于燕麦。

表 4 家庭牧场各优化调整方案计算结果
Table 4 Results of optimization adjustment schemes of family pasture

方案编号 Scheme No.	地下水可供水量 Groundwater available supply/(×10 ⁴ m ³)	灌溉人工草地适宜规模 Suitable scale of irrigation cultivated grassland/hm ²				适宜的牲畜饲养规模 Suitable scale of livestock/ sheep unit	
		玉米 Maize	紫花苜蓿 Alfalfa	燕麦 Oat	合计 Total	考虑饲草料质量 Consider forage quality	不考虑饲草料质量 No consider forage quality
1	5.55	3.17	11.41	1.27	15.85	449	418
2	5.49	3.46	12.45	1.38	17.29	475	440
3	5.55	3.05	12.22	0	15.27	447	415
4	5.55	4.28	10.99	0	15.27	449	413
5	5.55	3.09	12.37	0	15.46	451	418
6	5.55	4.31	11.09	0	15.40	452	415
7	5.49	4.69	12.07	0	16.76	477	436
8	5.49	3.37	13.47	0	16.84	476	440

2.4.3 基于水土草畜平衡评价的推荐结果

方案 2、方案 7 和方案 8 可承载的灌溉人工草地面积均大于现状灌溉面积,但目前鄂托克前旗对于灌溉人工草地的政策为控制灌溉面积不再新增,所以按照调整的种植结构和灌溉形式方案,按照现状的灌溉面积重新核算适宜的牲畜数量,计算方案 2、方案 7 和方案 8 考虑饲草料质量条件下可承载的牲畜只数分别为 464、475 和 473 羊单位,方案 2 与现状灌溉人工草地种植条件下(不考虑水资源超载)可承载的牲畜头数一致,但调整紫花苜蓿和燕麦的灌溉形式后,水资源处于可承载的范围内;方案 7 和方案 8 较现状做较大改动,燕麦调整为紫花苜蓿或玉米,紫花苜蓿灌溉形式由中心支轴式喷灌调整为地下滴灌,调整后可承载牲畜头数大于现状牲畜头数。不考虑调整紫花苜蓿灌溉形式的方案虽对牲畜的承载能力有适当的增加,但与现状牲畜饲养数量仍有一定的缺口。家庭牧场可考虑采用方案 2 的种植结构适当核减牲畜头数,维持水土草畜平衡;或选择采用方案 7 和方案 8,但仍保持现有牲畜饲养头数不增加,给水资源和天然草原更多的休养生息空间;也可选择其他方案,但需按照

计算结果核减灌溉人工草地面积和牲畜饲养数量或通过外购饲草料的形式满足牲畜饲养需求,维持牧场水土草畜平衡。

3 讨论

本文针对不同饲草料之间质量差别,提出将不同种类饲草料折算为标准干草后再进行水土草畜平衡计算,构建了考虑饲草料质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法,在鄂托克前旗一典型家庭牧场进行应用,评估了家庭牧场现状的水土草畜平衡状况,并提出了可行的优化调控方案,但牧区水土草畜平衡计算研究仍处于起步阶段,其平衡计算理论、方法和模型软件等方面仍需要在实践检验中进行逐步探索和完善,针对本研究的不足之处,提出如下认识与思考:

1) 利用灌溉人工草地产出的人工饲草料在冬春季节进行补饲或者舍饲,一方面解决天然草地丰枯草季饲草料供给与需求不匹配的问题^[28],提高牲畜饲养量及幼畜存活率,改善牧民生产生活条件;另一方面降低枯草季及返青季节天然草地放牧,实现天然草地保护与修复;

从典型家庭牧场分析结果来看,灌溉人工草地面积受本地水资源条件控制,当采用更先进的节水灌溉形式或种植水分利用率更高的饲草料作物可提高水土草资源对灌溉人工草地和牲畜的承载能力,根据计算结果推荐将紫花苜蓿灌溉由时针式喷灌调整为地下滴灌,相较于地下滴灌,时针式喷灌漂移损失较大,受风力等影响灌溉均匀性较差,同时从运行成本角度考虑,时针式喷灌机工作压力要求一般为 20 MPa,高于滴灌工作压力 10 MPa,且喷灌机运行每一跨需有独立的动力驱动装置,驱动电机功率约 1.1 kW,时针式喷灌运行能耗较高而灌溉利用效率稍低^[29]。而紫花苜蓿为多年生豆科草本植物,一般高产寿命可达 5~7 a,采用地下滴灌形式,滴灌带可一次性投入多年使用,运行成本低且无效地面蒸发损失小,水分利用效率高^[30]。另外改变种植方式成本投入主要为田间埋设主管道和地面软管的一次性投入,投入成本农牧民可以承受,尤其在用水紧张地区,农牧民相较核减灌溉面积更易接受调整灌溉形式。如考虑改变灌溉形式成本投入方面因素,不调整灌溉形式除需要核减灌溉面积外还需要降低牲畜饲养量或通过外购饲草料来满足饲草料缺口,然而,近年来干草价格连年上涨,通过外购饲草料满足牲畜饲养成本逐年增加,相较农区而言,牧区由于有几乎无成本的天然草地支撑牲畜饲养,使得牲畜肉类品质高但饲养成本相对低,如果通过外购饲草料的方式满足牲畜饲养需求,本着趋利避害的行为,牧民将更倾向于多利用无成本投入的天然草地,容易造成天然草地的超载^[31]。对于家庭牧场来说,通过选择适宜的灌溉形式,按照水资源条件确定灌溉人工草地规模,在干旱年份通过外购部分饲草料来弥补天然草地产草量的不足,在丰水年分向外售卖剩余的饲草料,达到年际间的水土草畜平衡比较可行。

2) 本次牧区水土草畜平衡计算考虑了饲草料质量,但仍未达到高草高用、低草低用的水平,因不同牲畜种类适宜的牧草不同,不同生长阶段对饲草料质量需求也不同,本文在采用总可消化养分对各类饲草料进行了统一折算,建立了考虑饲草料质量的水土草畜平衡计算方法,但应进一步研究饲草料质量需求与供给的动态平衡过程^[32],开展更精细的基于饲草料质量的草畜平衡配置。本文在进行水平衡计算时,对于天然草地上产生的降水补给量计算时未考虑天然草地放牧强度对降雨入渗补给的影响,天然草原放牧作为天然草原最大的人为影响因素,正干扰着草地水文循环与生态演进过程,仍需开展基于生态水文过程模拟的牧区水土草畜平衡调控研究,进一步揭示牧区水土草畜要素联动机制。

4 结 论

1) 本文分析了现有研究对牧区水土草畜平衡计算的不适应性,从水循环角度入手,考虑各类饲草料之间质量的差别,利用各类饲草料总可消化养分将饲草料折算为标准干草后再进行水土草畜平衡计算,构建了考虑饲草料质量的家庭牧场水土草畜平衡计算方法。为牧区水土草畜平衡计算及基本管理单元的水土草畜平衡管理供

一种新的思路与手段。

2) 以鄂托克前旗典型家庭牧场为例,采用提出的计算方法,计算了现状条件下考虑饲草料质量和不考虑饲草质量条件下可承载的灌溉人工草地面积与牲畜数量,评估了目前家庭牧场的水土草畜平衡状况,现状条件下家庭牧场水资源和牲畜均处于一个轻度超载状态,水资源超载率为 6.05%,考虑饲草料质量牲畜超载率为 5.38%,不考虑饲草料质量牲畜超载 12.98%。与鄂托克前旗整体情况基本一致。

3) 根据现状水土草畜平衡评估状况,提出了家庭牧场可行的调控方案,经方案对比分析,建议家庭牧场保持现有灌溉人工草地面积 16.66 hm²的条件下,可考虑将现有的 1.33 hm²固定式喷灌燕麦的灌溉形式调整为滴灌,将 12.00 hm²时针式喷灌紫花苜蓿灌溉形式调整为地下滴灌,按照计算结果核减牲畜头数至 464 羊单位,该方案牲畜饲养饲草料品种较丰富,有青燕麦、玉米饲料和高蛋白苜蓿干草;或采用将 1.33 hm²燕麦调整为种植玉米或紫花苜蓿,玉米灌溉形式全部采用滴灌,紫花苜蓿灌溉形式全部采用地下滴灌,调整后灌溉人工草地种植结构变为 4.66 hm²的滴灌玉米和 12.00 hm²的地下滴灌紫花苜蓿或 3.33 hm²的滴灌玉米和 13.33 hm²的地下滴灌紫花苜蓿,可承载的牲畜数量超过现状实际饲养数量,但建议保持现有牲畜饲养数量 470 羊单位不变,给水资源和天然草原更多的休养生息空间。

[参 考 文 献]

- [1] 贾幼陵. 草原退化原因分析和草原保护长效机制的建立[J]. 中国草地学报, 2011, 33(2): 1-5.
JIA Youling. Grassland degradation reasons and establishment of grassland protection long term mechanism[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨富裕. 树立“饲草就是粮食”理念,大力发展饲草产业[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 311-313.
YANG Fuyu. New concept “forage is a part of grains” to utmost spurring the development of forage industry [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 311-313. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王贵珍, 花立民, 杨思维, 等. 高寒草甸家庭牧场管理模型的初步开发[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 991-1003.
WANG Guizhen, HUA Limin, YANG Siwei, et al. The preliminary development of alpine meadow family pasture management model[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(4): 991-1003. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李和平, 史海滨, 包小庆, 等. 西北牧区灌溉人工草地适宜发展规模分析[J]. 中国草地学报, 2007, 29(4): 104-109.
LI Heping, SHI Haibin, BAO Xiaoqing, et al. Analysis of development scale of irrigated artificial pasture in western pastoral area[J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(4):

- 104-109. (in Chinese with English abstract)
- [5] 鹿海员, 李和平, 王军, 等. 牧区水-土-草-畜平衡调控模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 87-95.
LU Haiyuan, LI Heping, WANG Jun, et al. Regulation model and application for water-land-forage-livestock balance in pastoral areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(11): 87-95. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李和平, 包小庆, 鹿海员, 等. 我国牧区水-土-草-畜平衡研究进展与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 503-509.
LI Heping, BAO Xiaoqing, LU Haiyuan, et al. Review and perspective on water-land-forage-livestock balance in pastoral areas of China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 503-509. (in Chinese with English abstract)
- [7] 何莉, 杜煜, 张照堃, 等. 基于农牧业需水特性的洋河流域农业水资源优化配置[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 72-81.
HE Li, DU Yu, ZHANG Zhaolong, et al. Optimal allocation of agricultural water resources in Yanghe River Basin based on water demand characteristics of agricultural and animal husbandry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 72-81. (in Chinese with English abstract)
- [8] 谭倩, 蔡天宇, 张田媛, 等. 基于鲁棒规划方法的农业水资源多目标优化配置模型[J]. 水利学报, 2020, 51(1): 56-68.
TAN Qian, GOU Tianyu, ZHANG Tianyuan, et al. A multi-objective robust programming model for agricultural water management with uncertain weights [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(1): 56-68. (in Chinese with English abstract)
- [9] LAELAGO D, TEKLEAB S, DANANTO M. Optimization of long-term water allocation and analysis of adaptation strategies in the Bilate River Catchment, Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia [J]. International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology, 2021, 7(12): 1-10.
- [10] 李丽琴, 王志璋, 贺华翔, 等. 基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 377-387.
LI Liqin, WANG Zhizhang, HE Huaxiang, et al. Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-hydrological threshold regulation in inland arid region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 377-387. (in Chinese with English abstract)
- [11] 鹿海员, 李和平, 高占义, 等. 基于草原生态保护的牧区水土资源配置模式[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 123-130.
LU Haiyuan, LI Heping, GAO Zhanyi, et al. Water and land resources allocation model of pastoral area based on grassland ecological conservation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(23): 123-130. (in Chinese with English abstract)
- [12] LU H, LI H, WANG J, et al. Optimal water and land resource allocation in pastoral areas based on a water-land forage-livestock balance: A case study of Otog Front Banner, Inner Mongolia, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(10): 10328-10341.
- [13] 孙金金, 焦婷, 李亚娟, 等. 高寒区草地-家畜优化配置研究: 以青海省玛沁县 1 牧户为例[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 728-735.
SUN Jinjin, JIAO Ting, LI Yajuan, et al. A study on the optimal allocation of the alpine pasture grassland-livestock-A case of a herder in Maqin County, Qinghai Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(3): 728-735. (in Chinese with English abstract)
- [14] 方精云, 白永飞, 李凌浩, 等. 我国草原牧区可持续发展的科学基础与实践[J]. 中国科学, 2016, 61(2): 155-164.
FANG Jingyun, BAI Yongfei, LI Linghao, et al. Scientific basis and practical ways for sustainable development of China's pasture regions[J]. Science China, 2016, 61(2): 155-164. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王雪婷. 苜蓿种质饲草产量及品质评价与 SSR 标记分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020
WANG Xueting. Forage Yield and Quality Evaluation with SSR Marker Analysis of Alfalfa Germplasm[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [16] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123.
KOU Dan, SU Derong, WU Di, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 116-123. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Lei, WANG Lu, ZHAO Baoping, 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. (in Chinese

- with English abstract)
- [18] 宋建超, 杨航, 鱼小军, 等. 氮磷肥配施对高寒区垂穗披碱草饲草产量及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 731-742.
- SONG Jianchao, YANG Hang, YU Xiaojun, et al. Effect of combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer on the forage yield and nutritional quality of elymus nutans in alpine region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3): 731-742. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王旭哲, 张凡凡, 马春晖, 等. 压实度对玉米青贮开窖后营养品质及有氧稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 300-306.
- WANG Xuzhe, ZHANG Fanfan, MA Chunhui, et al. Effect of compaction on nutritional quality and aerobic stability of silage corn after opening silos[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 300-306. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王旭哲, 张凡凡, 马春晖, 等. 同/异型乳酸菌对青贮玉米开窖后品质及微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 296-304.
- WANG Xuzhe, ZHANG Fanfan, MA Chunhui, et al. Corn silage fermentation quality and microbial populations as influenced by adding homo- and hetero-fermentative bacteria after silos opened[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 296-304. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵晖, 李尚中, 樊廷录, 等. 种植密度与施氮量对旱地地膜玉米产量、水分利用效率和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 169-177.
- ZHAO Hui, LI Shangzhong, FAN Tinglu, et al. Effects of planting density and nitrogen fertilizer rate on yield, water use efficiency and quality of dryland maize with film mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 169-177. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘辉, 宋孝玉, 覃琳, 等. 基于改进关键场的干旱风沙草原牧区草畜平衡评价[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 294-300.
- LIU Hui, SONG Xiaoyu, QIN Lin, et al. Evaluation of forage-livestock balance for pastoral areas in arid sandy grasslands using improved key pasture approach [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 294-300. (in Chinese with English abstract)
- [23] LIU H, SONG X, QIN L, et al. Improvement and application of key pasture theory for the evaluation of forage-livestock balance in the seasonal grazing regions of China's alpine desert grasslands[J]. Sustainability, 2020, 12: 6794.
- [24] 覃琳, 宋孝玉, 冯湘华. 基于划区轮牧理论的祁连山北麓牧区动态草畜平衡研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 256-264.
- QIN Lin, SONG Xiaoyu, FENG Xianghua. Forage-livestock dynamic balance of pasturing area based on rotational grazing theory in northern slope of Qilian Mountains[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(11): 256-264. (in Chinese with English abstract)
- [25] 廖梓龙, 魏永富, 郭中小, 等. 干旱区灌溉饲草草地载畜量计算方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 87-94.
- LIAO Zilong, WEI Yongfu, GUO Zhongxiao, et al. Calculation method of livestock carrying capacity of irrigation forage grassland in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(22): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- [26] 贺福全, 陈懂懂, 李奇, 等. 三江源区高寒草地营养承载力时空格局[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2808-2816.
- HE Fuquan, CHEN Dongdong, LI Qi, et al. Temporal and spatial patterns of herbage and nutrient carrying capacity of alpine grassland of Sanjiangyuan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12): 2808-2816. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中华人民共和国农业部. 天然草地合理载畜量的计算. NY/T 635-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [28] 关士琪, 董芮彤, 唐增. 牧户超载过牧行为的研究: 基于可持续生计的视角[J]. 中国草地学报, 2021, 43(7): 86-94.
- GUAN Shiqi, DONG Ruitong, TANG Zeng. Study on the herders' overgrazing behavior: based on the perspective of sustainable livelihoods[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(7): 86-94. (in Chinese with English abstract)
- [29] 余淑艳. 灌溉方式与磷素对紫花苜蓿生产性能和土壤质量的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- YU Shuyan. Effects of Irrigation Methods and Phosphorus application on Alfalfa Production Performance and Soil Quality[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [30] 贾朗, 王越甲, 马晓丹, 等. 地上和地下滴灌对玉米生长和生物量分配的模拟研究[J]. 新疆农业大学学报, 2021, 44(4): 235-240.
- JIA Lang, WANG Yuejia, MA Xiaodan, et al. A simulation study of effects of above-ground drip irrigation and below-ground drip irrigation on growth and biomass allocation of maize[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021, 44(4): 235-240. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张聪, 闫慧敏, 姚晓军. 甘南地区草畜平衡动态评估[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1903-1917.

ZHANG Cong, YAN Huimin, YAO Xiaojun. Dynamic assessment of grass-livestock balance in Gannan[J]. Journal

of Natural Resources, 2022, 37(7): 1903-1917. (in Chinese with English abstract)

Calculation method and application of the tradeoff on water, land, forage, and livestock in family pasture considering forage quality

LU Haiyuan^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, LI Heping^{1,2}, ZHENG Hexiang^{1,2}, MIAO Ping³

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China; 2. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe Eco-hydrological System, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Ordos River and Lake Protection Center, Ordos 017000, China)

Abstract: Most pastoral areas in China are subjected to arid and semi-arid zones, particularly with annual precipitation of less than 400 mm. Since irrigation is indispensable for the cultivated grass industry, the protection of natural grassland can focus on the water, land, forage, and livestock balance with the development of the irrigation cultivated grasslands, rather than the forage-livestock balance only. Taking the specific pastoral management units as the entry point, this study aims to propose a new evaluation for the tradeoff between the water and land for the family pasture from the perspective of the water cycle. A water-land-forage-livestock balance was constructed to consider the quality differences between forage species in the calculation of the forage-livestock balance. An example was taken as the typical family pasture in the Otog Front Banner of the Inner Mongolia Autonomous Region in China. The assessment showed that the current water, land, forage, and livestock status of the family pasture were in a mild overload state, with a water resource overload rate of 6.05%. In the condition of water, land, forage, and livestock balance, the livestock overload rates with/without considering forage quality were 5.38% and 12.98%, respectively. By contrast, the livestock overload rates with/without considering forage quality were 1.29%, and 9.05%, respectively, under current planting conditions (without considering water resource overload). An optimal combination of water-use schemes was proposed to feature the different planting structures and irrigation adjustments, according to the status quo in this family pasture. A systematic analysis was made to determine the available water supply, and the carrying capacity for the irrigation of cultivated grasslands, and livestock under multiple optimizations. It was found that the carrying capacity was determined for the irrigation of cultivated grasslands by the available water supply. More water-efficient irrigation was adopted to select the forage crops with the decreased water consumption, in order to significantly improve the support capacity of water resources in the irrigation-cultivated grasslands. Livestock carrying capacity significantly increased after considering the forage quality, indicating more consistency with the actual condition of this family pasture. Consequently, the family pasture was maintained the current areas of cultivated grassland without increasing, while adjusting the irrigation of alfalfa to underground drip irrigation. Once the irrigation form was adjusted to drip irrigation under the condition of oat planting, the number of livestock was reduced to 464 sheep units, in order to maintain the balance of water, land, forage, and livestock in the family pasture. Furthermore, the oats were adjusted to grow the corn or alfalfa in the median condition of oats. Although the number of livestock was more than the current number of livestock, some suggestions can keep the current number of livestock raised in family pastures, in order to make more room for the rest and recuperation of water resources and natural grassland. The finding can provide a new approach to calculating and managing the water, land, forage, and livestock balance in pastoral areas.

Keywords: forage-livestock balance; evaluation; ecology; water-land balance; forage quality; family pasture