

文章编号: 1672-3317(2025)01-0034-09

水氮调控对多年生黑麦草生长特性和产量的影响

段科龙¹, 牛最荣^{1*}, 张真荣², 宋淑珍³, 李妙祺⁴, 郭盛¹

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院, 兰州 730070; 2.甘肃省引大入秦水资源利用中心, 兰州 730300; 3.甘肃省农业科学院 畜草与绿色农业研究所, 兰州 730070; 4.甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要:【目的】解决永登县当地人工草地建设与畜牧规模不协调问题, 探明节水省肥的人工草地水氮配施方案, 实现永登县草食畜牧业的可持续发展。【方法】以多年生黑麦草为研究对象, 设置2个灌水水平(灌水上下限以土壤含水率占田间持水率的百分比计): W1(75%~85%)、W2(55%~65%), 3个施氮水平: N1(210 kg/hm²)、N2(180 kg/hm²)、N3(150 kg/hm²), 共6种水氮处理组合, 每个处理重复3次, 分析不同水氮施量对各生育阶段的黑麦草生长指标、产量和水肥利用效率的影响。利用熵权-TOPSIS法对各处理进行综合评价, 探寻多年生黑麦草最优水氮处理。【结果】不同水氮施量均对黑麦草的生长发育有显著影响, 生长指标及产量均随水氮施量的增加而增加, 氮肥偏生产力随施氮量的增加而降低, 水分利用效率随灌水量的增加而降低, 且施氮对黑麦草各指标影响程度大于灌水。生育期末W1N1处理株高、叶绿素和产量均为最高, W2N1处理茎粗最大, W1N3处理氮肥利用效率最高, W2N2水分利用效率最高。熵权-TOPSIS法计算得出W2N2处理综合评价指数最高。【结论】当灌水保持在田间持水率的55%~65%, 施氮量为180 kg/hm²时, 多年生黑麦草的综合效益最高。研究结果可为永登县种植黑麦草的水氮管理工作提供理论依据和技术支撑。

关键词: 黑麦草; 水氮调控; 生长特性; 产量; 水氮利用效率; 熵权-TOPSIS法

中图分类号: S543+.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2024169

段科龙, 牛最荣, 张真荣, 等. 水氮调控对多年生黑麦草生长特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 34-42.

DUAN Kelong, NIU Zuirong, ZHANG Zhenrong, et al. Optimal irrigation and nitrogen fertilization for growth and yield of perennial ryegrass (*Lolium perenne*)[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 34-42.

0 引言

【研究意义】多年生黑麦草(*Lolium perenne*)为禾本科黑麦草属牧草, 抗寒性强, 分蘖多, 是世界上广泛栽培的畜牧业养殖用草, 可多次刈割^[1]。因其易栽培、产量高、适口性好且蛋白质丰富等优点而被认为是温带地区畜牧生产效果极佳的青绿饲料^[2]。永登地区农业生产方式主要以旱作农业和山区畜牧业为主体, 长期处于半农半牧状态, 畜牧业重点以山区农户为单位进行小规模家庭养殖, 依靠天然草地进行散养^[3]。近年来, 在政策引导和项目带动下, 永登县草畜牧业发展势头良好, 但与现代草畜牧业发展的要求相比还存在一定的差距, 当地草场与畜牧业发展仍处于不协调状态, 为追求产量, 过量灌水施氮肥现象普遍存在, 造成水氮资源浪费,

生态环境问题日益突出^[4]。研究如何通过合理的水氮调控模式提高多年生黑麦草的生产性能和水肥利用效率, 降低水氮过剩对环境的污染, 对当地农业生产和畜牧业发展具有重要的理论价值和实践意义。

【研究进展】作物生长过程中受到光、热、水、气、养分等诸多因子影响, 其中水氮资源是农业生产中较容易控制的2个因素, 也是决定作物生产水平的关键因素, 适宜的水氮施量可显著促进作物生长并提高作物产量和水氮利用效率^[5-6]。李越鹏等^[7]研究表明, 灌溉定额3119.8 m³/hm²、施氮量300 kg/hm²可以显著提高棉花的水分利用效率和氮肥利用率, 促进干物质积累, 使单位面积铃数和单铃质量获得较大值, 最终实现棉花高产。李振松等^[8]研究表明保持适当的土壤含水率可以促进植物对氮素的吸收与利用, 降低因干旱胁迫带来的减产损失, 灌溉定额264 mm、施氮量100 kg/hm²能使燕麦的产量和品质达到最优, 后期继续增加灌水和施氮量会增加燕麦的倒伏率和土壤板结程度, 降低燕麦的产量和品质。王培华等^[9]研究表明棉花产量随灌水量的增多而增加, 中度盐碱土中过多施氮会导致棉花

收稿日期: 2024-04-23

修回日期: 2024-09-11

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(21YF5FA094); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(24GSLK060, 22GSLK068, 22GSLK069)

作者简介: 段科龙(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文学与水资源。E-mail: 1870387995@qq.com

通信作者: 牛最荣(1964—), 男, 教授级高工, 博士生导师, 博士, 研究方向为农业节水与水资源高效利用。E-mail: Niuzr@gsau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

无法将多余氮肥吸收利用，土壤氮素累积，降低生长前期蒸腾速率、净光合速率，进而抑制棉花生长。薛丽华等^[10]研究表明，增加滴灌量和施氮量主要促进 0~20 cm 土层小麦的根系生长，从而提高产量。科学合理的水氮配施方案不仅能使作物保持高产，减少土壤养分损失和水资源消耗，也是现代农业可持续发展的保障^[11]。

【切入点】节水节肥是中国现代农业发展的主流方向，合理的水氮管理是提高水氮利用效率和保证作物稳产的重要措施^[12]，因此，对人工草地各生育阶段的水氮需求规律进行探讨研究是十分必要的。

【拟解决的关键问题】本研究以节水省肥为目标，以增产为目的，力求水氮资源都能得到充分利用。在水氮双因素调控种植模式下，结合当前国内牧草生产主推的基肥，通过研究不同水氮组合对黑麦草生长情况、产量和水肥利用效率的影响，分析多年生黑麦草的水氮需求，以期研究出永登县种植多年生黑麦草的最佳水氮管理模式。研究结果可为多年生黑麦草在永登县的推广种植及水氮管理工作提供理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地隶属于甘肃省永登县中川镇廖家槽村，地理坐标为 103°63'E, 36°59'N, 平均海拔 2 000 m。该地属于典型温带大陆性季风气候，年平均气温 10.3 °C，年平均日照时间为 2 446 h，无霜期为 180 d，年平均降水量为 327 mm，主要集中在 6—9 月。试验地土壤质地为砂壤土，无种植作物记录，田间持水率 23.8%（质量含水率），0~40 cm 土壤体积质量 1.56 g/cm³，pH 值为 8.7，铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾量分别为 45.875、84.799、35.745、169.027 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 5—11 月进行，参考当地生产实践（灌水量：5 340 m³/hm²；施氮量：折合纯氮约 210 kg/hm²）及其他学者研究成果^[13-16]，设计 2 个灌水梯度：充分灌溉 W1（75%~85%）、中度亏缺 W2（55%~65%），各水分处理均以计划湿润层土壤质量含水率占田间持水率的百分比控制，计划湿润层深度为 40 cm，当计划湿润层含水率达到下限时开始灌水，直至土壤水分达到各处理上限后停止灌水；3 个施氮梯度：高氮 N1（210 kg/hm²）、中氮 N2（180 kg/hm²）、低氮 N3（150 kg/hm²），共 6 种水氮组合处理，每个处理重复 3 次，共计 18 个试验小区，每小区面积 18 m²（3 m×6 m），采取随机区组设计，每

个小区间隔 0.5 m，试验前统一灌水至田间持水率。试验各生育时期灌水量见图 1。

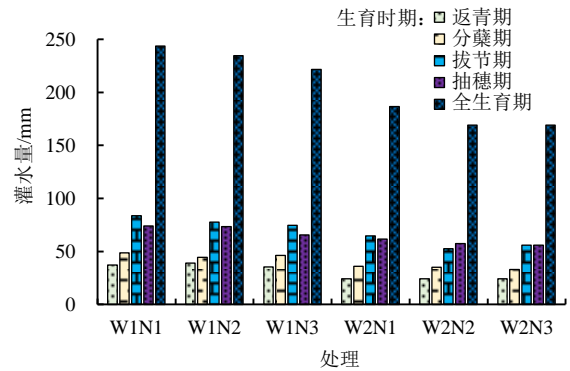


图 1 不同处理间黑麦草各生育时期灌水量

Fig.1 Irrigation amount of *Lolium perenne* in different growth stages between different treatments

供试黑麦草品种为“雅晴”，购自百绿（天津）草业有限公司。播种时间为 2023 年 5 月 21 日，播前施入农家肥（当地腐熟的羊粪，含 N 量为 0.6%）7 500 kg/hm²、过磷酸钙（有效磷量：P₂O₅≥12%，含硫量：S≥8%）225 kg/hm²作为基肥，使用翻耕机松散平整土地，混合基肥。播种方式为人工条播，播种量为 20 kg/hm²，播深 2~3 cm，行间距 30 cm，播种后镇压。灌水方式为不覆膜滴灌，采用内镶式滴灌带，购自大禹节水（酒泉）有限公司。滴灌带壁厚 0.2 mm，滴头间距 30 mm，流量 2 L/h，管道材质为高密度聚乙烯，每 2 行作物间铺设 1 条滴灌带，灌水量通过各小区支管上独立安装的阀门和水表（精度 0.000 1 m³，大禹节水（酒泉）有限公司）控制。土壤质量含水率采取烘干法进行测量，每 7 天进行 1 次，每次降雨后加测。施氮方式为人工撒施，氮肥选用三环牌尿素（N≥46%），追施的肥量分别在返青期（20%设计肥量）、分蘖期（20%设计肥量）、拔节期（30%设计肥量）、抽穗期（30%设计肥量）撒入田中。

1.3 测定指标及分析方法

1.3.1 牧草物候期观测

采用目测法记录黑麦草返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期的开始时间，以每小区 50%以上植株出现显著性状变化作为物候期分界线。

1.3.2 观测指标

1) 株高：株高的测定用精确度为 0.1 cm 的钢卷尺测量，测量部位从地面到作物生长最高点。

2) 茎粗：选取长势均匀的植株，使用精度为 0.01 cm 的数显游标卡尺，在离地面 3~5 cm 测定作物生殖枝茎粗并记录读数。

3) 叶绿素相对量（SPAD 值）：在每个小区随机选取 10 株作物，使用便携式叶绿素计（型号为

SPAD-502 PLUS, 浙江托普云农科技股份有限公司) 对每个作物的叶片测量 3 次记录其平均值。

4) 产量 (鲜质量): 各小区随机选取 1 行离地面 3~5 cm 整齐刈割, 折算成每公顷产量。

5) 灌溉水利用效率^[17]:

$$IWUE=Y/I, \quad (1)$$

式中: $IWUE$ 为灌溉水利用效率 (kg/m^3); Y 为多年生黑麦草的单位面积产量 (kg/hm^2); I 为多年生黑麦草全生育期灌水量 (m^3/hm^2)。

6) 氮肥偏生产力^[18]:

$$PFPN=Y/N, \quad (2)$$

式中: $PFPN$ 为氮肥偏生产力 (kg/kg); N 为总施氮量 (kg/hm^2)。

1.3.3 熵权-TOPSIS 综合评价体系

基于熵权-TOPSIS 对各指标进行综合评价, 利用熵权法得到的指标权重更加客观, 使最终结果更为合理。具体计算步骤如下^[19]:

1) 数据标准化

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, \dots, X_{mj})}{\max(X_{1j}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{1j}, \dots, X_{mj})}, \quad (3)$$

式中: $i=(1, 2, \dots, m)$, $j=(1, 2, \dots, n)$ 。

利用式 (4) 计算标准化后的矩阵的特征比重 P_{ij} ; 根据式 (5) 计算出各个指标的信息熵 e_j , 最终得到指标的权重值 W_j 。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad (4)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}, \quad (5)$$

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}. \quad (6)$$

2) 确定归一化矩阵 $Z = W_j \times X_{ij}$, 各指标的正、负理想解为:

$$z_j^+ = \max\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}\} (j=1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

$$z_j^- = \min\{z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{mj}\} (j=1, 2, \dots, n). \quad (8)$$

3) 采用欧氏距离表示各评价对象与正、负理想解的差异

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(z_{ij} - z_j^+)]^2}, \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(z_{ij} - z_j^-)]^2}, \quad (10)$$

D^+ 越大, 说明评价对象与最优解距离越远, D^+ 越大评价对象越劣; D^- 越大, 说明评价对象与最劣解距离越远, D^- 越大评价对象越优。

4) 计算相对贴近度

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad (11)$$

C_i 越大, 则代表该处理的效果越好。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2021 对试验数据进行整理分析、进行熵权-TOPSIS 综合评价并进行图形绘制, 使用 IBM SPSS Statistics 24.0 软件统计分析试验数据, 采用单因素方差分析对不同处理间各生育时期指标进行显著性检验, 在 $P < 0.05$ 的显著性水平下利用 Duncan 法进行多重比较, 采用相关性双变量分析产量与生长指标之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 水氮施量对不同时期多年生黑麦草生长的影响

2.1.1 对多年生黑麦草株高的影响

不同水氮施量对多年生黑麦草株高的影响如表 1 所示。由表 1 可知, 不同水氮处理下多年生黑麦草株高存在差异。从不同施氮处理来看, 返青期时, W1 处理下, 3 种施氮处理的株高呈 N1 处理 > N2 处理 > N3 处理, N1 处理较 N2、N3 处理分别提高了 13.7%、16.53%; 在 W2 灌水处理下, 株高呈 N3 处理 > N2 处理 > N1 处理, N3 处理较 N2、N1 处理分别提高了 5.61%、35.72%。在分蘖期、拔节期和抽穗期时, 相同灌水处理下多年生黑麦草株高始终呈 N1 处理 > N2 处理 > N3 处理, 在 W1 灌水处理下 N1 处理显著大于 N2、N3 处理, N1 处理较 N2、N3 处理分别提高了 2.61%~18.23%、2.87%~24.42%。W2 灌水水平下, 分蘖期时 N1 处理较 N2、N3 处理提高了 8.92%、15.75%; 拔节期 N1 处理显著大于 N2、N3 处理, N1 处理较 N2、N3 处理分别提高了 5.41%、15.69%; 抽穗期 N1 处理显著大于 N3 处理但与 N2 处理无显著差异。

从不同灌水处理来看, N1 处理下, 株高始终呈 W1 处理 > W2 处理, 分蘖期 W1 处理与 W2 处理无显著差异, 返青期、拔节期和抽穗期 W1 处理较 W2 处理提高了 2.81%~43.73%; N2、N3 处理下, 返青期株高 W2 处理 > W1 处理, W2 处理较 W1 处理分别提高了 1.66%、10.03%; 分蘖期、拔节期和抽穗期时株高呈 W1 处理 > W2 处理, W1 处理较 W2 处理分别提高了 1.80%~5.05%、4.17~8.32%。

综上所述, 黑麦草在高水处理 (W1 处理) 下, 株高在返青期随施氮量增加而增高, 但并未表现出显著差异, 在分蘖期之后随施氮量增加株高显著增高; 受到水分胁迫 (W2 处理) 时, 在返青期时增加施氮量会抑制黑麦草生长, 降低植株高度, 在分蘖期之后, 增加施氮会促进株高增长, 施氮量越大株高越高。

表 1 不同处理对多年生黑麦草株高的影响

Tab.1 Effects of each treatment on plant height of *Lolium perenne*

cm

处理	返青期		分蘖期		拔节期		抽穗期	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
N1	26.72±1.17a	18.59±3.59b	34.95±1.65a	30.65±1.89ab	55.47±1.14a	49.69±0.65b	82.8±1.58a	80.54±0.69b
N2	23.5±4.95ab	23.89±2.42ab	29.56±2.61b	28.14±2.74b	49.45±0.75b	47.14±0.77c	80.69±1.40b	79.26±0.78b
N3	22.93±0.52ab	25.23±9.94a	28.09±3.87b	26.48±1.02b	44.74±0.81d	42.95±0.92c	80.49±0.54b	74.32±1.18c

注 表中不同小写字母表示不同水氮处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。

2.1.2 对多年生黑麦草茎粗的影响

不同水氮施量对多年生黑麦草茎粗的影响如表 2 所示。多年生黑麦草在返青期至拔节期茎粗增长率缓慢, 增长幅度为 0.24~0.43 mm, 拔节—抽穗期迅速增长, 增长幅度为 0.62~0.86 mm。从不同施氮处理来看, 相同灌水处理下多年生黑麦草的茎粗在全生育期内始终呈 N1 处理>N2 处理>N3 处理。在 W1 灌水处理下, 返青期、分蘖期和拔节期时 N1 处理与 N2 处理无显著差异, 抽穗期 N1 处理显著大于 N2 处理, N1 处理较 N2 处理显著提高 3.71%, N1 处理始终显著大于 N3 处理, 提高了 4.06%~8.04%; 在 W2 灌水处理下, N1 处理始终显著大于 N2、N3 处理, N1 处理较 N2、N3 处理提高了 4.14%~6.07%、

7.52%~17.49%。从不同灌水处理来看, 在 N1 处理下, 多年生黑麦草茎粗始终呈 W2 处理>W1 处理, 但 2 种处理之间差异不显著; 在 N2 处理下, 返青期和抽穗期 W2 处理>W1 处理, 分蘖期和拔节期 W1 处理>W2 处理, 2 种处理之间无显著差异; 在 N3 处理下, 茎粗表现为 W1 处理>W2 处理, 在分蘖期 W1 处理较 W2 处理显著提高了 4.03%, 返青期、拔节期和抽穗期时 2 个灌水处理之间无显著差异。

综上得出, 增加施氮量能促进黑麦草茎秆增粗, 抽穗期时提高施氮量对黑麦草茎秆增粗作用更强烈。灌水对黑麦草茎粗影响较弱, N1、N2 处理下 2 个灌水处理之间均无显著差异, N3 处理在分蘖期增加灌水能显著提高茎粗。

表 2 不同处理对多年生黑麦草茎粗的影响

Tab.2 Effects of each treatment on stem diameter of *Lolium perenne*

mm

处理	返青期		分蘖期		拔节期		抽穗期	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
N1	2.53±0.07ab	2.62±0.05a	2.71±0.02ab	2.77±0.06a	2.82±0.03ab	2.86±0.09a	3.63±0.04a	3.72±0.05a
N2	2.45±0.05bc	2.47±0.06bc	2.67±0.03abc	2.66±0.02bc	2.74±0.01bc	2.73±0.04bc	3.50±0.08b	3.53±0.05b
N3	2.35±0.10cd	2.23±0.09d	2.58±0.10c	2.48±0.01d	2.71±0.01c	2.66±0.09c	3.36±0.04c	3.28±0.03c

2.1.3 对多年生黑麦草叶绿素的影响

不同水氮施量对多年生黑麦草叶绿素的影响如表 3 所示。多年生黑麦草 SPAD 值在返青期至分蘖期显著增加, 增加幅度为 3.93~6.53, 分蘖—抽穗期增加幅度缩小, 增加幅度为 1.94~5.44。从不同施氮处理来看, 多年生黑麦草 SPAD 值始终呈 N1 处理>N2 处理>N3 处理。在 W1 灌水处理下, 返青期和分蘖期 N1 处理显著大于 N2、N3 处理, N1 处理较 N2、N3 处理分别提高了 9.37%~12.23%、9.72%~12.51%, N2、N3 处理之间无显著差异, 拔节期 N1、N2、N3 处理之间无显著差异, 抽穗期 N1 处理显著大于 N3 处理, 提高了 11.36%, N1、N2 处理之间无显著差异; 在 W2 灌水处理下, N1、N2、N3 处理之间始终无显著差异。从不同灌水处理来看, N1 处理下

SPAD 值均为 W1 处理>W2 处理, 分蘖期 W1 处理显著大于 W2 处理, 提高了 5.89%, 返青期、拔节期和抽穗期 2 个灌水处理间无显著差异; N2 处理下, 返青期、分蘖期和拔节期 SPAD 表现为 W2 处理>W1 处理, 抽穗期表现为 W1 处理>W2 处理, 且 W1、W2 处理均无显著差异; N3 处理下返青期和分蘖期 SPAD 表现为 W2 处理>W1 处理, 分蘖期 W2 处理显著大于 W1 处理, 提高了 4.88%, 拔节期和抽穗期表现为 W1 处理>W2 处理, W1、W2 处理无显著差异。

综上得出, 适量增加水氮投入可促进黑麦草叶绿素合成。在返青期、分蘖期和抽穗期同时增加水氮施量有利于增加 SPAD 值; 若施氮量不足, 在返青期和分蘖期减少灌水量有利于增加 SPAD 值。

表 3 不同处理对多年生黑麦草 SPAD 值的影响

Tab.3 Effects of each treatment on SPAD of *Lolium perenne*

处理	返青期		分蘖期		拔节期		抽穗期	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
N1	37.70±1.30a	36.82±1.95ab	44.23±4.14a	41.77±0.98b	45.27±2.14a	44.00±0.49ab	47.24±1.49a	45.99±2.21ab
N2	34.47±0.49b	36.37±0.92ab	39.41±0.15cd	40.60±1.21bc	42.45±1.32ab	42.57±2.68ab	44.85±4.09ab	43.56±0.19ab
N3	34.36±2.05b	34.67±0.64b	38.29±1.36d	40.16±0.38bc	42.27±1.90ab	41.38±1.01b	42.42±2.41b	42.10±0.88b

2.2 水氮施量对多年生黑麦草产量的影响

不同水氮施量对多年生黑麦草产量的影响如表 4 所示, 水氮互作对产量影响显著。在相同灌水处理下, 不同施氮处理之间有显著差异, 产量随施氮量的增加而显著增加, 产量始终表现为 N1 处理>N2 处理>N3 处理, W1 处理下, N1、N2、N3 处理产量分别为 19 669.83、18 837.41、17 575.82 kg/hm², N1 处理较 N2、N3 处理提高了 4.42%、11.91%; W2 处理下, N1、N2、N3 处理产量分别为 19 102.88、18 811.83、17 428.71 kg/hm², N1 处理较 N2、N3 处理提高了 1.55%、9.61%。相同施氮水平下, 不同灌水处理产量表现为 W1 处理>W2 处理, N1 处理下, W1 处理较 W2 处理显著提高了 2.97%; N2、N3 处理下, W1 处理较 W2 处理提高了 0.14%、0.84%, 并未表现出显著差异。

总体看, 黑麦草产量对水氮都表现出正相关性, 且对氮素的响应大于灌水量。较高的水氮施量 (N1) 能实现高产, 但在提高施氮量的过程中增产效果在逐渐减弱, 且中、低氮量 (N2、N1) 下灌水对产量影响较弱, 产量在 W1、W2 处理之间未表现出差异性。

表 4 不同处理对多年生黑麦草产量的影响

Tab.4 Effects of each treatment on yield of

处理	<i>Lolium perenne</i> kg/hm ²	
	W1	W2
N1	19 669.83±281.74a	19 102.88±110.21b
N2	18 837.41±70.58c	18 811.83±56.80c
N3	17 575.82±76.15d	17 428.71±125.98d

2.3 水氮施量对多年生黑麦草 IWUE 和 PFPN 的影响

表 5 为水氮施量对多年生黑麦草 IWUE 和 PFPN 影响的变化趋势。不同施氮处理间比较, PFPN 始终表现为 N3 处理>N2 处理>N1 处理, 各处理间存在显著差异性。随着施氮量的增加, 多年生黑麦草对氮肥的吸收利用效率在逐渐降低, PFPN 呈下降趋势, W1 处理下 N1 处理较 N2、N3 处理分别降低了 7.87%、14.42%; W2 处理下 N1 处理较 N2、N3 处理分别降低了 10.40%、16.18%。可见, 增加灌水量对多年生黑麦草吸收利用氮肥有一定的补偿作用, PFPN 有所提升。IWUE 在 W1 处理表现为 N1 处理>N2 处理>N3 处理, 在 W2 处理下表现为 N2 处理>N3 处理>N1 处理, 2 种灌水处理下 N1、N2、N3 处理间均不存在显著差异。从不同灌水处理来看, 相同施氮处理下, PFPN 表现为 W1 处理>W2 处理, N1 处理下, W1 处理较 W2 处理显著

提高了 2.97%; N2、N3 处理下 W1 处理与 W2 处理未表现出差异。IWUE 表现为 W2 处理显著大于 W1 处理。N1、N2、N3 处理下 W2 处理较 W1 处理分别提高了 27.05%、38.62%、30.32%, 氮肥控制在 180 kg/hm² 且适当减少灌水量有利于提高 IWUE。

总体看, PFPN 和 IWUE 有显著的递减规律。PFPN 随施氮量增加而显著降低, 在高施氮量下增加灌水 PFPN 略有提高; IWUE 随灌水量增加而显著降低, 增加施氮量对 IWUE 影响较弱, IWUE 并未表现出明显的增减。

表 5 不同处理对多年生黑麦草水肥利用效率的影响

Tab.5 Effects of each treatment on water and fertilizer use efficiency of *Lolium perenne*

处理	PFPN(kg·kg ⁻¹)		IWUE(kg·m ⁻³)	
	W1	W2	W1	W2
N1	77.14±1.11c	74.91±0.43d	8.08±0.43b	10.27±0.72a
N2	83.72±0.31b	83.61±0.25b	8.03±0.23b	11.13±0.32a
N3	90.13±0.39a	89.38±0.64a	7.96±0.60b	10.37±1.07a

2.4 水氮调控下对多年生黑麦草生长指标与产量的相关性分析

不同水氮施量下多年生黑麦草生长指标与产量的相关性分析结果 (表 6) 表明, 黑麦草产量与生长指标间均呈正相关关系, 说明提高株高、茎粗、叶绿素均有利于提高产量。返青期, 茎粗与产量呈极显著正相关, SPAD 值与产量显著相关, 株高与产量呈不显著正相关; 分蘖期株高、茎粗、叶绿素与产量呈极显著正相关关系; 拔节期株高、茎粗与产量呈极显著正相关, 叶绿素与产量呈显著相关; 抽穗期株高、茎粗、叶绿素与产量呈极显著正相关。除返青期株高与返青期、分蘖期、抽穗期茎粗呈负相关关系外, 其他指标间均呈现正相关关系。

2.5 水氮调控下对多年生黑麦草的综合评价

多年生黑麦草的生长、产量和水肥利用效率的最优处理存在一定差异, 因此需要对多年生黑麦草各处理进行综合分析。基于相关性分析, 保留相关系数大于 0.65 的生长指标进行熵权-TOPSIS 评价, 综合评价结果如图 2 所示。从评价结果中可看出, W2N2 处理的相对贴近度排第 1, W2N1 处理第 2, 综合效益优于其他处理, 说明在土壤含水率保持在 55%~65%田间持水率、施氮量为 180 kg/hm² 时对多年生黑麦草的生长最有利, 在获得较高的产量的同时也能兼具节水省肥的特性, 宜在实际生产中推广应用。

表 6 多年生黑麦草生长指标与产量的相关性分析

Tab.6 Correlation analysis of *Lolium perenne* growth index and yield

相关系数	株高				茎粗				SPAD 值				产量 D1
	返青 A1	分蘖 A2	拔节 A3	抽穗 A4	返青 B1	分蘖 B2	拔节 B3	抽穗 B4	返青 C1	分蘖 C2	拔节 C3	抽穗 C4	
A1	1.00												
A2	0.14	1.00											
A3	0.13	0.67**	1.00										
A4	0.42	0.53*	0.71**	1.00									
B1	-0.24	0.57*	0.79**	0.48*	1.00								
B2	-0.21	0.66**	0.80**	0.53*	0.94**	1.00							
B3	0.19	0.68**	0.74**	0.57*	0.75**	0.77**	1.00						
B4	-0.09	0.56*	0.85**	0.50*	0.84**	0.83**	0.82**	1.00					
C1	0.18	0.29	0.46	0.44	0.44	0.37	0.54*	0.61**	1.00				
C2	0.32	0.42	0.55*	0.38	0.55*	0.46	0.71**	0.62**	0.70**	1.00			
C3	0.23	0.27	0.62**	0.43	0.52*	0.60**	0.52*	0.57*	0.38	0.51*	1.00		
C4	0.17	0.61**	0.68**	0.60**	0.51*	0.51*	0.59**	0.71**	0.52*	0.46	0.29	1.00	
D1	0.15	0.66**	0.91**	0.74**	0.81**	0.83**	0.79**	0.86**	0.59*	0.69**	0.57*	0.73**	1.00

注 *表示相关性显著 ($P<0.05$); **表示相关性极显著 ($P<0.01$)。表中 A1—A4 代表返青—抽穗期的株高; B1—B4 代表返青—抽穗期的茎粗; C1—C4 代表返青—抽穗期的 SPAD 值; D1 代表产量。

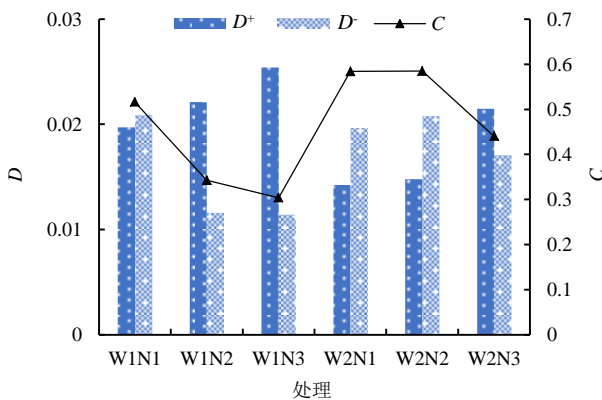


图 2 对多年生黑麦草的不同处理的综合评价

Fig.2 A comprehensive evaluation of different treatments of *Lolium perenne*

3 讨论

在实际生产中，合理的水氮耦合是促进作物生长发育和提高其生产力的重要手段^[20-21]。本研究结果表明，灌水和施肥对多年生黑麦草的株高、茎粗、叶绿素及产量等生长指标均产生显著影响，同时也影响着水氮利用效率。已有研究^[22-23]表明，在灌水充足的条件下，牧草的株高、分蘖数和叶面积有明显增幅，其光合作用也明显增强，而在水分胁迫下，作物生长随胁迫程度增大而降低，胁迫越大，作物生长速率越低，产量越小。施氮可明显增加牧草生长高度、分蘖数和地上生物量，从而实现增产^[24]。本研究表明，黑麦草株高在返青期增施氮肥并不会明显提升，受到水分胁迫时还会降低株高，分蘖期之后随施氮量增加而显著提高，同时增加灌水能与氮肥产生叠加作用，进一步提高植株高度。李国

辉等^[25]研究表明，棉花的茎粗随水氮施量增加而增加，相同灌水处理下棉花茎粗随氮肥增加而显著增加，同一施氮量下灌水较多的处理茎粗较大。本研究表明，黑麦草茎粗对灌水因素不敏感，不同灌水处理间差异较小，但能看出在高施氮量 (N1) 下 W2 处理略大于 W1 处理，低施氮量 (N3) 下 W1 处理略大于 W2 处理，而施氮能显著增加黑麦草茎粗，尤其在抽穗期增施氮肥对黑麦草茎粗促进作用更明显。闫承宏等^[26]研究表明，灌水对柳枝稷 SPAD 值影响大于施氮，随水肥梯度的上升，氮素在达到一定程度时不再提高 SPAD 值，继续增施氮肥还会导致 SPAD 值降低。本研究表明，氮素对黑麦草 SPAD 值影响更甚于灌水，SPAD 值整体上随施氮量增加而增加，增加灌水量对促进叶绿素合成效果较弱。牧草产量是株高、茎粗、枝条数等多个因子彼此协调的结果，茎秆粗、植株高大的牧草往往产草量高^[27]，这与本研究结果相近。研究^[28-29]表明，在同一施氮量条件下增加灌水量能提高显著作物产量，而本研究中黑麦草产量仅高施氮量 (N1) 下增加灌水量显著提高了黑麦草产量，中、低施氮量 (N1、N2) 下不同灌水之间黑麦草产量无显著差异。造成这种结果的原因或是黑麦草本身具有良好的抗逆性和对氮素强烈的需求，导致对水分胁迫的反映不敏感，在中低氮 (N1、N2) 条件下黑麦草对氮素的需求未达到饱和状态，这时对水的响应较小，而主要受氮肥的限制，而高氮条件下氮浓度过大，此时增加灌水能促进黑麦草根对氮的吸收，从而显著增产。这与前人^[30-32]研究相似。施氮量对黑麦草产量有显著的正效应，而随着氮素的增加，增产效率在

降低。这说明 210 kg/hm² 施氮量已接近黑麦草所需氮量的阈值。高水高氮虽然能大幅提升多年生黑麦草生长速度和产量,但同时也会产生一些负面影响,如降低水氮利用效率造成资源浪费,这对于牧草的大面积推广种植相当不利。

针对水肥供应对水肥利用效率影响的研究也很多。王艳丹等^[33]研究表明水肥减量后番茄水分利用效率明显提高,当灌溉定额降低到 1 806.70 m³/hm² 时水分利用效率达到最大值,而肥料偏生产力始终没有差异。胡伟等^[34]研究表明,增加滴灌量,降低施氮量,苜蓿的水分利用效率逐渐下降,氮肥偏生产力随施氮量增加而显著降低,而对灌水量的反应比较平稳,只有在低施氮量(60 kg/hm²)下增加灌水才有明显提高,中、高氮量(120、180 kg/hm²)下无差异。本试验结果表明, IWUE 主要由灌水量控制,同一施氮量下,灌水量越大 IWUE 越低,同一灌水量下,随施氮量增加 IWUE 无显著变化; PFPN 主要由施氮量控制,同一灌水量下,施氮量越高 PFPN 越低,高施氮量(N1)下,增加灌水提高了 PFPN,中、低氮(N2、N3)条件下无显著变化;其中 W2N2 处理下 IWUE 最高, W1N3 处理 PFPN 最高。作物水氮利用效率峰值与作物产量峰值并非完全吻合,作物高产与资源环境安全二者是矛盾的^[35]。为求得一个适宜的水氮施量方案,本研究通过熵权-TOPSIS 模型进行综合评价,结果表明 W2N2(55%~65%田间持水率, 180 kg/hm²)结果最好,由于该地区属半干旱地带,水资源禀赋较弱,因此,该水氮方案可作为最优组合策略。本试验针对多年生黑麦草的生长特性指标、产量和水氮利用效率进行研究,其研究结果为永登县多年生黑麦草的推广种植有一定指导作用,而多年生黑麦草为多年生牧草,设置 2 种灌水水平对寻找多年生黑麦草的需水规律略显不足,关于多年生黑麦草最优水氮供应条件仍有待探究。

4 结论

1) 水氮交互作用比单一灌水或施氮因素对多年生黑麦草的影响更为显著,多年生黑麦草株高、叶绿素均随水氮施量的增加呈增长趋势,在水分胁迫条件下增加施氮量对茎粗生长更有利。

2) 施氮量对产量的影响效应大于灌水量,降低灌水量会减弱多年生黑麦草增产效果, W1 处理下增加施氮量增产效果更优, W1N1 处理产量最高,为 19 669.83 kg/hm²。

3) 施氮量增加导致氮肥偏生产力下降,而增加灌水量可补偿氮肥利用。W1 灌水处理下,水分利用

效率差异较小,灌水量或超出多年生黑麦草生长发育的实际需水量。

4) 基于熵权-TOPSIS 模型,对多年生黑麦草各指标进行综合评价, W2N2 处理的综合效益优于其他处理,即灌水保持在田间持水率的 55%~65%、施氮量为 180 kg/hm² 的水肥组合为试验结果中最佳的水氮配施方案,既能达到节水省肥的目的,又可使牧草得到良好的养分供给效果,同时为其他内陆干旱区的牧草种植提供了参考依据。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 陈腾达,赵晓登,李玉帅,等. 多花黑麦草营养品质及在动物饲养方面的研究进展[J]. 饲料研究, 2020, 43(10): 146-149.
CHEN Tengda, ZHAO Xiaodeng, LI Yushuai, et al. Research progress of nutritional quality and animal feeding of *Lolium multiflorum*[J]. Feed Research, 2020, 43(10): 146-149.
- [2] 杨晓鹏,赵文达,孙铭,等. 多花黑麦草引进种质与产草量相关形态性状的变异分析[J]. 中国草地学报, 2018, 40(6): 39-46.
YANG Xiaopeng, ZHAO Wenda, SUN Ming, et al. Variation analysis of morphological characterization related to yield in introduced annual ryegrass germplasm[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(6): 39-46.
- [3] 魏洋静,王文棣. 县域特色农业现代化发展浅析[J]. 热带农业工程, 2022, 46(4): 28-30.
WEI Yangjing, WANG Wendi. Study on the modernization of county characteristic agriculture[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2022, 46(4): 28-30.
- [4] 唐仲霞,齐广平,银敏华,等. 水氮调控对无芒雀麦氮磷钾累积、品质及水氮利用的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(5): 60-70.
TANG Zhongxia, QI Guangping, YIN Minhua, et al. Effects of water and nitrogen regulation on nitrogen, phosphorus and potassium accumulation, quality, water and N utilization of *Bromus inermis*[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(5): 60-70.
- [5] 郭丙玉,高慧,唐诚,等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3 679-3 686.
GUO Bingyu, GAO Hui, TANG Cheng, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3 679-3 686.
- [6] 侯艳,崔宁博,郭立,等. 西南季节性干旱区夏玉米水氮耦合效应与水氮生产函数研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 34-40.
HOU Yan, CUI Ningbo, GUO Li, et al. The effect of water-nitrogen coupling on growth of summer maize in seasonally arid areas and water-nitrogen production function in Southwestern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 34-40.
- [7] 李越鹏,张富仓,侯翔皓,等. 种植密度和水氮互作对新疆棉花生长和水氮利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(9): 45-56, 66.
LI Yuepeng, ZHANG Fucang, HOU Xianghao, et al. Effects of planting density and water-nitrogen interaction on cotton growth and water-nitrogen utilization in Southern Xinjiang[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2021, 49(9): 45-56, 66.
- [8] 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 Zhensong, LI Xianglin, WAN Liqiang. Effect of water-nitrogen coupling on oat production performance in Horqin sandy land[J].

- Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(4): 145-152.
- [9] 王培华, 史文娟, 张艳超. 土壤水氮调控对盐碱地棉花生长发育及水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 33-42.
WANG Peihua, SHI Wenjuan, ZHANG Yanchao. Improving soil water and nitrogen management to facilitate growth and water-nitrogen use efficiency of cotton in saline-alkali soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 33-42.
- [10] 薛丽华, 赵连佳, 陈兴武, 等. 不同水氮运筹对滴灌冬小麦根系生长、水分利用及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 21-31.
XUE Lihua, ZHAO Lianjia, CHEN Xingwu, et al. Effects of different water and nitrogen application patterns on the growth of root and yield of winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 21-31.
- [11] 刘秀花, 卢杰, 齐燕, 等. 水氮耦合对作物氮素吸收利用与迁移转化的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 1-12.
LIU Xiuhua, LU Jie, QI Yan, et al. The effects of water-nitrogen coupling on uptake and transformation of nitrogen in soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(4): 1-12.
- [12] 酒歌, 王栋, 马娇. 膜下滴灌水氮调控对甘薯品质、产量及土壤水氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 63-72.
JIU Ge, WANG Dong, MA Jiao. Effect of water and nitrogen transport on sweet potato quality, yield and soil water and nitrogen distribution under drip irrigation with plastic mulch[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 63-72.
- [13] 唐仲霞, 银敏华, 齐广平, 等. 水氮耦合对无芒雀麦产量及氮磷钾化学计量特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 532-545.
TANG Zhongxia, YIN Minhua, QI Guangping, et al. Effects of optimal irrigation and nitrogen coupling on *Bromus inermis* yield, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometric characteristics[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(3): 532-545.
- [14] 姜渊博, 齐广平, 银敏华, 等. 水分调控与种植模式对人工草地土壤水分及产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 260-270.
JIANG Yuanbo, QI Guangping, YIN Minhua, et al. Effects of water regulation and planting patterns on soil moisture, yield and quality in artificial grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 260-270.
- [15] 徐敏云, 刘自学, 胡自治. 灌溉对三种冷季型草坪草蒸散耗水的影响[J]. 草原与草坪, 2004(1): 36-40.
XU Minyun, LIU Zixue, HU Zizhi. Effect of irrigation quota on evapotranspiration of three cold-season turfgrass[J]. Grassland and Turf, 2004(1): 36-40.
- [16] 成文竞, 崔建宇, 闵凡华, 等. 三种草坪草的根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 179-183.
CHENG Wenjing, CUI Jianyu, MIN Fanhua, et al. Root distribution characteristics of three turfgrasses and their impact on soil nutrient content[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(1): 179-183.
- [17] 江文格, 刘江凡, 赵鑫, 等. 黄沙栽培模式下咸水滴灌对设施番茄生长及产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(2): 356-366.
JIANG Wenge, LIU Jiangfan, ZHAO Xin, et al. Effects of saline water drip irrigation on growth and yield of protected tomato under yellow sand cultivation model[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(2): 356-366.
- [18] 李佳, 王义, 肖蓉, 等. 不同灌溉施肥方式对夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(2): 104-110.
LI Jia, WANG Yi, XIAO Rong, et al. Effects of different irrigation and fertilization modes on yield and water and nitrogen utilization of summer maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(2): 104-110.
- [19] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7.
ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7.
- [20] 李鑫, 张永清, 王大勇, 等. 水氮耦合对红小豆根系生理生态及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(12): 1 511-1 519.
LI Xin, ZHANG Yongqing, WANG Dayong, et al. Effects of coupling water and nitrogen on root physio-ecological indices and yield of adzuki bean[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(12): 1 511-1 519.
- [21] 李莉婕, 赵泽英, 黎瑞君, 等. 水氮钾耦合对火龙果产量和品质的调控效应[J]. 南方农业学报, 2022, 53(3): 859-868.
LI Lijie, ZHAO Zeying, LI Ruijun, et al. Effects of irrigation and nitrogen, potassium fertilizer coupling on yield and quality of pitaya[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(3): 859-868.
- [22] 高涵, 吴伟, 刘秀萍, 等. 水分胁迫下几种冷季型草坪草抗旱机理研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 126-128.
GAO Han, WU Wei, LIU Xiuping, et al. Studies on drought tolerance mechanism of five cold-season turfgrass at water stress[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3): 126-128.
- [23] 王茜, 纪树仁, 沈益新. 土壤水分和施氮水平对紫花苜蓿苗期生长的互作效应分析[J]. 草业学报, 2017, 26(12): 48-55.
WANG Qian, JI Shuren, SHEN Yixin. Interactive effects of soil moisture and nitrogen application rate on seedling growth of alfalfa[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 48-55.
- [24] 文雅, 周培, 张忠雪, 等. 施氮和灌溉互作对垂穗披碱草生物量及构成要素的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(2): 330-338.
WEN Ya, ZHOU Pei, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of irrigation quantity and nitrogen application rate on *Elymus nutans* biomass and its components[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(2): 330-338.
- [25] 李国辉, 王兴鹏, 唐茂淞, 等. 水氮运筹对新疆无膜滴灌棉花生长发育及土壤温室气体排放的影响[J]. 棉花学报, 2023, 35(1): 63-78.
LI Guohui, WANG Xingpeng, TANG Maosong, et al. Effects of water and nitrogen management on cotton growth and development, and soil greenhouse gas emission under non-film drip irrigation in Xinjiang[J]. Cotton Science, 2023, 35(1): 63-78.
- [26] 闫承宏, 吴娜, 刘吉利, 等. 水氮耦合对盐碱地柳枝稷光合生理及生物质产量的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(4): 582-590.
YAN Chenghong, WU Na, LIU Jili, et al. Effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic physiology and biomass yield of switchgrass in saline-alkali soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(4): 582-590.
- [27] 赵力兴, 高阳, 李天琦, 等. 施肥对科尔沁沙地苜蓿生长及产草量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(7): 136-144.
ZHAO Lixing, GAO Yang, LI Tianqi, et al. Effects of fertilization on growth and grass yield of alfalfa in Horqin sandy land[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(7): 136-144.
- [28] 呼红伟, 蔡焕杰, 王鑫宇, 等. 不同氮肥条件下补充灌溉对冬小麦生长、产量和 *WUE* 的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 51-59.
HU Hongwei, CAI Huanjie, WANG Xinyu, et al. Effects of supplementary irrigation on biomass, *WUE* and yield of winter wheat under different nitrogen fertilizer conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 51-59.
- [29] 闫文渊, 秦军红, 段绍光, 等. 水氮耦合对马铃薯光合特性、块茎形成和品质的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(7): 1 491-1 504.
YAN Wenyuan, QIN Junhong, DUAN Shaoguang, et al. The effect of water-nitrogen coupling on potato photosynthesis, tuber formation and quality[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(7): 1 491-1 504.
- [30] 刘欢平, 郑彩霞, 刘涛, 等. 基于产量、品质和水氮利用效率的油橄榄水氮耦合方案优选[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9): 1 843-1 853.
LIU Huanping, ZHENG Caixia, LIU Tao, et al. Priority of water-nitrogen coupling scheme for olive based on yield, quality, and water-nitrogen use efficiency[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(9): 1 843-1 853.

- [31] 闫丽娟, 谈燕, 马维伟, 等. 节水减氮对甘肃河西灌区青贮玉米生长及水氮利用效率的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(8): 2 545-2 553.
YAN Lijuan, TAN Yan, MA Weiwei, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on growth and water and nitrogen use efficiency of silage maize in Hexi irrigation area of Gansu Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(8): 2 545-2 553.
- [32] 蔡晓, 吴祥运, 王东, 等. 水氮互作对滴灌夏玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 33-42.
CAI Xiao, WU Xiangyun, WANG Dong, et al. Combined effects of water and nitrogen application on growth and water use of summer maize under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 33-42.
- [33] 王艳丹, 何光熊, 杨溟舟, 等. 水肥耦合对干热河谷冬春番茄产量及其品质的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(8): 2 297-2 304.
WANG Yandan, HE Guangxiang, YANG Haozhou, et al. Coupling effects of water and fertilizer on the yield and quality of winter and spring tomato in dry-hot valley[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(8): 2 297-2 304.
- [34] 胡伟, 张亚红, 李鹏, 等. 水氮供应对地下滴灌紫花苜蓿生产性能及水氮利用效率的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(2): 41-50.
HU Wei, ZHANG Yahong, LI Peng, et al. Effects of water and nitrogen supply under drip irrigation on the production performance rate and water and nitrogen use efficiency of alfalfa[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2): 41-50.
- [35] 冯福学, 慕平, 赵桂琴, 等. 西北绿洲灌区饲用燕麦耗水特性及产量变化对水氮耦合的响应[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 74-84.
FENG Fuxue, MU Ping, ZHAO Guiqin, et al. Water consumption characteristics and yields of fodder oat under different irrigation and nitrogen fertilization regimes in the northwest oasis irrigation area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(8): 74-84.

Optimal irrigation and nitrogen fertilization for growth and yield of perennial ryegrass (*Lolium perenne*)

DUAN Kelong¹, NIU Zuirong^{1*}, ZHANG Zhenrong², SONG Shuzhen³, LI Miaoqi⁴, GUO Sheng¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Water Resources Utilization Center of Gansu Province, Lanzhou 730300, China; 3. Institute of Animal & Pasture Science and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: 【Objective】 Ryegrass (*Lolium perenne*) is extensively cultivated in Northwestern China for various purposes ranging from forage to landscaping. This paper presents the results of an experimental study on optimal irrigation and nitrogen fertilization for growth and yield of perennial ryegrass in managed grasslands in Yongdeng County in Gansu province, China. 【Method】 The field experiment consisted of two irrigation treatments by keeping the soil water content above 75%-85% (W1) or 55%-65% (W2) of the field capacity. Each irrigation treatment had three nitrogen treatments by applying 210 (N1), 180 (N2) and 150 kg/hm² (N3) of nitrogen. In each treatment, we measured the growth traits, yield, and water and nitrogen use of the ryegrass at different growth stages. The optimal irrigation and nitrogen fertilization was determined by the entropy-weight TOPSIS model. 【Result】 Both irrigation and nitrogen significantly influenced ryegrass growth and yield. Increasing irrigation amount or nitrogen application improved growth traits and yield. However, nitrogen partial factor productivity (*PFPN*) decreased with increase in nitrogen application, and increasing irrigation amount reduced irrigation water use efficiency (*IWUE*). Nitrogen application had a greater impact on growth and yield of the ryegrass than irrigation. The W1N1 combination resulted in the highest plant height, chlorophyll content, and yield, while W2N1 produced the largest stem diameter. The W1N3 combination had the highest *PFPN*, and *IWUE* was greatest in W2N2. Entropy-weight TOPSIS analysis showed that W2N2 was optimal for ryegrass growth and yield in the study area. 【Conclusion】 Maintaining soil moisture above 55%-65% of the field capacity combined with 180 kg/hm² of nitrogen fertilization is the optimal strategy for improving the growth and yield of perennial ryegrass in Yongdeng County, Gansu Province, China.

Key words: *Lolium perenne*; water and nitrogen regulation; growth characteristics; yield; water and nitrogen utilization efficiency; entropy weight TOPSIS

责任编辑: 赵宇龙