

# 放牧对中国北方草地生态系统水分利用效率的影响

王云英<sup>1,2</sup>, 裴薇薇<sup>1,2</sup>, 辛莹<sup>1</sup>, 郭小伟<sup>1</sup>, 杜岩功<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**解析草地生态系统植物水分利用效率对不同放牧强度的响应特征,对于提升草地生产和生态屏障功能具有重要意义。收集中国北方草地开展的 38 个放牧试验中关于放牧对植物水分利用效率影响的试验数据进行 Meta 分析。结果表明:放牧对中国北方草地植物水分利用效率影响的平均效应值为  $-0.18 \pm 0.04$  (95% 置信区间:  $-0.27 \sim -0.10$ ), 放牧极显著降低草地生态系统植物水分利用效率 ( $P < 0.01$ )。不同类型草地平均效应值降低幅度从高到低依次为典型草原 > 高寒草地 > 草甸草原 > 温性草原 > 荒漠草原。放牧对典型草原与高寒草地、草甸草原平均效应值具有极显著和显著影响,对荒漠草原与温性草原无显著影响。植物水分利用效率对放牧强度的响应顺序从高到低依次为重度、轻度和中度放牧,重度放牧极显著降低植物水分利用效率 ( $P < 0.001$ ), 中度放牧可以提高植物水分利用效率,轻度放牧对于植物水分利用效率影响不显著。土壤 C/N、海拔和年均气温分别可以解释 60.88%、11.81% 和 6.45% 效应值变异。基于优化放牧制度以及对重度退化草地恢复的治理,提高草地土壤有机碳含量,将会提升草地生态系统植物水分利用效率。

**关键词:**放牧强度;水分利用效率;Meta 分析;随机效应模型;平均效应值

**中图分类号:**S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)04-0049-07

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.04.007



植物水分利用效率(water use efficiency, WUE)是单位水量通过植物叶片蒸腾耗散时所能同化的光合产物量,是草地生态系统碳水耦合及植被演替的重要指标<sup>[1]</sup>。水分是影响陆地生态系统生长发育的主要限制因素<sup>[2]</sup>,植物对水分的利用主要体现在植物生长季,植物 WUE 的高低直接关系到植被生产量和草地生态系统水源涵养功能<sup>[3]</sup>。

草地是全球陆地生态系统的重要组成部分,占全国陆地面积的 40.7%,是我国面积最大的植被类型<sup>[4]</sup>。放牧作为草地生态系统最直接的利用方式,对

草地生态系统生态健康有重要影响,放牧导致的草地退化一直是生态学家关注的科学问题<sup>[5-7]</sup>。放牧对草地生态健康的影响主要体现在植被、土壤和水分等方面<sup>[8]</sup>。合理的放牧可以促进植物的生长发育<sup>[9]</sup>。超载放牧会使植株矮小化,降低草地生态系统生产力,进而降低草地植物 WUE<sup>[10-11]</sup>。有研究表明,青海海北不同放牧梯度下的高寒草甸表现出在适度放牧状态下,植物 WUE 提高了 51.4%,同时受降水量的影响<sup>[12]</sup>。内蒙古短花针茅草原中多年生禾草,在重度放牧状态下,植物 WUE 降低 3.4%<sup>[13-14]</sup>。科罗拉多州中北部短草草原北部的中原试验场在重度放牧状态下降水利用效率呈显著下降趋势<sup>[15]</sup>。巴西坦桑尼亚几内亚放牧草场在适度放牧状态下,植物 WUE 提高了 37.7%<sup>[16]</sup>。重度放牧直接影响植物光合作用,降低植物 WUE<sup>[17-19]</sup>。这些研究对于合理利用草地生态系统、提高草地质量以及优化草地生态系统放牧制度等方面具有重要作用。然而这些研究都是针对单个试验

收稿日期:2020-09-04; 修回日期:2020-11-02

基金项目:科技部基础调查专项(2017FY100202);国家自然科学基金面上项目(31770532)

作者简介:王云英(1993-),女,青海民和人,硕士研究生。

E-mail: wangyunying@nwipb. cas. cn

杜岩功为通讯作者。

E-mail: ygdu@nwipb. cas. cn

点进行,没有从尺度方面进行拓展,且不同研究结果中试验点地理位置、气候条件等存在差异。故本研究基于 Meta 分析,揭示我国北方草地生态系统植物 WUE 对不同放牧强度的响应特征及主要调控因素,为提升草地植物水分利用效率和草地生态屏障功能提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 数据收集

通过中国知网数据库,检索条件关键词“放牧”,且“草地”“草原”“草甸”“荒漠”;且“植物水分利用效率”,中英文论文共计搜索到 68 篇。原文下载后,我们按照以下标准进行对文章的筛选:1)文章中所涉及的试验均为野外放牧试验,没有模拟放牧试验,且试验都是在植物生长季进行的;2)所有文章中均明确了样本量和 SD;3)试验中有一个空白对照。最终选用 10 篇文章,10 篇论文包括 38 组数据被采用,进行 Meta 分析。调查样点主要分布在内蒙古自治区和青海省。对于论文以图片形式发表的数据,采用 Get Data Graph Digitizer 软件进行数据提取。

### 1.2 数据统计分析方法

基于均值的效应值计算(反应比):

$$\ln R = \ln \frac{x_e}{x_c} = \ln(x_e) - \ln(x_c)$$

式中: $x_e$  为放牧草地植物水分利用效率均值, $x_c$  为对照均值。

与效应值相对应的研究内方差:

$$V_{\ln R} = \frac{S_e^2}{N_e x_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c x_c^2}$$

式中: $S_e$  为处理的标准差, $S_c$  为对照的标准差。

基于随机效应模型的平均效应值及置信区间的计算:

单个研究结论的权重: $w_i^* = 1/(v_i + \tau^2)$

平均效应值:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i^* y_i}{\sum_{i=1}^k w_i^*}$$

总体标准误差:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i^*}}$$

平均效应值的 95% 置信区间:  $CI = \bar{y} \pm 1.96 SE$

公式中  $v_i$  表示研究内方差,  $\tau^2$  表示研究间方差,  $y_i$  为单个研究效应值。

数据通过 R 语言(4.0.2 版本)程序进行 Meta 分析。单个试验效应值和平均效应值的计算采用随机效应模型(rma)。当效应值的整体异质性很强时(即  $Q_t$  值较高,且  $P < 0.05$ ),表明放牧试验的效应值均存在较大差异。基于混合效应模型(mods),引入解释变量对这种差异进行分析。发表偏差通过漏斗图对称性检验完成(Egger's regression test)。使用软件 OriginPro 9.1 进行图件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 放牧对我国北方草地植物水分利用效率影响的平均效应值

平均效应值表示放牧处理组与对照组的差异程度,即表明放牧对草地植物 WUE 影响程度,效应绝对值越高,则放牧作用对植物 WUE 影响越强。放牧对我国北方草地植物水分利用效率影响的平均效应值为  $-0.18 \pm 0.04$ (95% 置信区间为  $-0.27 \sim -0.10$ )(图 1,表 1)。放牧极显著降低我国北方草地植物水分利用效率( $P < 0.01$ )。

放牧对不同类型草地植物 WUE 影响的平均效应值,顺序依次为典型草原 > 高寒草地 > 草甸草原 > 温性草原 > 荒漠草原(图 2)。放牧极显著降低了典型草原和高寒草地植物 WUE( $P < 0.01$ ),显著降低草甸草原植物 WUE( $P < 0.05$ ),但对荒漠草原与温性草原影响作用不显著。草甸草原、温性草原、荒漠草原的平均效应值均高于中国草地平均效应值。

放牧对植物 WUE 影响的效应值异质性检验表明数据异质性较强( $P < 0.0001$ )(表 1),需要引入解释变量(分类变量和连续变量)对数据异质性来源进一步进行解析。

### 2.2 放牧强度对我国北方草地生态系统植物水分利用效率影响的平均效应值及异质性检验

本研究引入了分类变量即不同放牧强度来作为解释变量,探讨轻度、中度、重度放牧对草地生态系统植物水分利用效率的影响。放牧对平均效应值具有极显著影响( $P < 0.01$ )(表 2)。放牧强度对草地植物 WUE 影响顺序从高到低依次为重度、轻度和中度放牧。重度放牧与轻度、中度放牧之间存在极显著性差异( $P < 0.01$ ),中度与轻度放牧之间无显著差异。中度放牧可

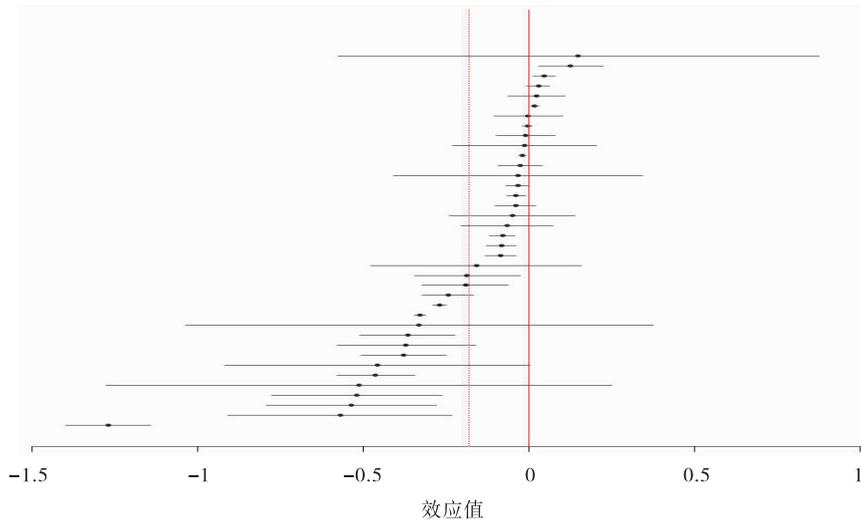


图 1 放牧对我国北方草地生态系统植物水分利用效率影响效应值森林图

Fig. 1 Forest plots of effect size of grazing activity on grassland WUE in China

注:黑色原点代表每一个试验平均效应值(标准误),红色虚线代表整体试验的平均效应值,红色实线表示效应值等于 0

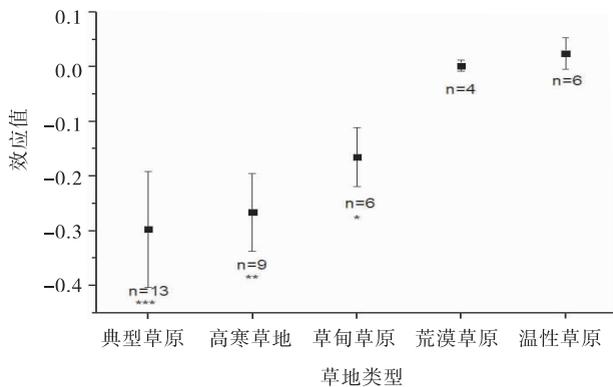


图 2 放牧对处理下不同类型草地的效应值

Fig. 2 Comparative analyses of the effects of grazing on the average effect value of different types of grassland

注:\*\*\*表示  $P < 0.001$ , \*\*表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

以提高草地植物 WUE(表 3)。放牧强度的残差异质性检验结果表明残差仍具有异质性,需要进一步引入其他解释变量(表 2)。

### 2.3 平均效应值对气象因素及土壤理化性质等连续变量的响应特征

本研究进一步引入土壤 C/N、海拔、年均气温、降水量、土壤全氮、容重等连续变量来解释变异异质性。结果表明放牧草地土壤 C/N、海拔和年均气温对平均效应值具有显著影响( $P < 0.05$ )。基于拟合方程结果发现:平均效应值与降水量之间存在负相关关系,而其他连续变量间均存在正相关关系(表 4)。土壤 C/N、海拔和年均温分别可以解释 60.88%、11.81% 和 6.45% 的效应值变异。

表 1 放牧对我国北方草地植物水分利用效率影响的效应值异质性检验

Table 1 Test of heterogeneity on effect sizes of grazing activity on grasslands WUE in northern China

类型	自由度	平均效应值	$P$	效应值异质性检验( $Q_t$ )	$P$
草地	37	$-0.18 \pm 0.04$	$< 0.01$	2 429.47	$< 0.000 1$

表 2 放牧强度对平均效应值解释变量及残差异质性检验

Table 2 Test of heterogeneity explanatory variables and residuals of grazing intensity on the average effect value

因素	解释变量异质性检验(QM)	自由度	$P$	残差异质性检验(QE)	自由度	$P$
放牧强度	19.40	3	0.000 2	1 383.97	35	$< 0.000 1$

注:放牧强度包括轻度、中度和重度放牧,围封为对照组

表 3 不同放牧强度对平均效应值的影响及 95% 置信区间

Table 3 The influence of different grazing intensity on average effect value and 95% confidence interval

放牧类型	平均效应值	95% 置信区间
轻度	-0.07±0.05 <sup>a</sup>	-0.17~-0.02
中度	0.06±0.05 <sup>a</sup>	-0.03~0.16
重度	-0.21±0.04 <sup>b</sup>	-0.29~-0.14

注: 同列不同小写字母表示存在差异显著  $P < 0.05$

表 4 植物水分利用效率平均效应值对气候及土壤理化性质等影响的响应

Table 4 Response of the average effect value of plant WUE of grassland to the impact of climate and soil physical and chemical properties

解释变量(x)	异质性检验(QM)	P	拟合方程	效应值变异 $R^2 / \%$
土壤 C/N	11.95	0.001	$Y = 0.51 + 0.0327x$	60.88
海拔	5.86	0.02	$Y = -0.44 + 0.0002x$	11.81
年均气温	3.63	0.03	$Y = -0.12 + 0.0332x$	6.45
降水量	3.03	0.08	$Y = -0.64 - 0.0014x$	4.02
全氮	1.11	0.29	$Y = -0.31 + 0.0669x$	1.73
土壤容重	0.24	0.62	$Y = 0.39 - 0.5101x$	0.00

注: Y 是平均效应值

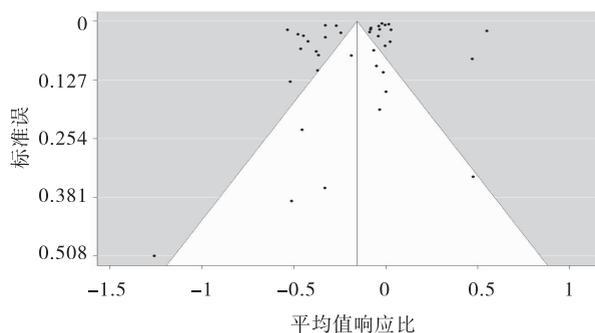


图 3 放牧对中国北方草地生态系统植物 WUE 影响的发表偏倚性检验

Fig. 3 Publication preference test on the effects of grazing on WUE of grassland ecosystem in northern China

### 3 讨论

植物水分利用效率是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标,反映植物耗水与其干物质生产之间的关系<sup>[19]</sup>。本研究通过收集中国北方草地开展的 38 个放牧试验中关于放牧对植物水分利用效率影响的试验数据进行 Meta 分析,发现放牧活动干扰对草地植物 WUE 具有极显著影响。重度放牧对草地生态系统植物 WUE 的影响作用最强,且极显著降低草地生态系统植物 WUE。中度放牧能提高植物 WUE。这可

### 2.4 放牧强度对草地植物 WUE 影响效应值漏斗图的对称性检验

Meta 分析是对研究效应值和平均效应值的量化评价,数据来源于公开发表的论文,可能会受论文选择性偏倚影响。通过对漏斗图对称性进行检验 ( $z = -1.15, P = 0.25$ ),  $P$  值远大于 0.05,说明本研究所采用数据的漏斗图检验结果基本对称(图 3)。因此,本研究并无发表偏爱性,研究结果具备充分可信度。

能是因为适度放牧状态下草地凋落物较少、植物蒸散量小,土壤含水量低,能够提高植被 WUE<sup>[3,9]</sup>。研究表明,在内蒙古锡林郭勒盟典型草原地区处于中度退化的草地能够通过改变自身水分来源,增加植物吸水能力和保水能力,减少水分丢失,提高植物 WUE 等来适应环境的变化<sup>[20]</sup>。同时,重度放牧草地由于受到家畜采食踩踏影响,造成土壤结构发生变化,土壤孔隙度减小,土壤含水量降低<sup>[21]</sup>。当重度放牧草地植物被家畜大量啃食后,受到损伤的叶片光合产物受到限制,叶片呼吸作用也会显著增强,致使植物 WUE 下降<sup>[22]</sup>。研究表明,新疆地区的 6 种草地类型植物 WUE 均与放牧存在负效应关系,放牧会导致植物光合作用下降,植物 WUE 也会随之下降<sup>[23]</sup>。随着放牧强度的增加,从禁牧到重度放牧,植物 WUE 呈现先下降再上升再下降的趋势<sup>[20-23]</sup>。因此,在草地生态系统可以采取适当放牧的方式来提高植物 WUE,这对于提高草地生态系统水源涵养能力和草地的质量具有重要意义。

草地生态系统植物 WUE 是由光合作用和蒸腾作用决定的,凡影响植物这两个生理过程的因素都会影响草地植物 WUE<sup>[24]</sup>。另外,草地生态系统植物 WUE 受降水量<sup>[23]</sup>、气温<sup>[24-27]</sup>、海拔<sup>[28]</sup>、土壤湿度<sup>[27-28]</sup>、蒸散<sup>[28]</sup>等各种因素的影响。气温和降水量是影响青藏

高原高寒草地植物 WUE 的主要影响因素,且植物 WUE 均与降水量呈负相关,与温度呈微弱正相关<sup>[29]</sup>,本研究也发现降水量与植物 WUE 呈负相关,年均气温与植物 WUE 呈正相关。这可能是因为降水量的增加一方面提高了土壤水分含量,另一方面可能造成土壤水分流失,土壤养分散失,限制植物的正常生长,进而降低植物水分利用能力<sup>[30]</sup>。当温度升高时,植物的光合速率加强,且大于其蒸腾速率,故植物 WUE 呈增加趋势<sup>[31]</sup>。本研究最后进一步引入解释变量气候及土壤理化性质后发现,土壤 C/N 和海拔、年均气温是影响放牧对草地生态系统植物 WUE 平均效应值的主要调控因素。这可能是因为放牧活动会显著减小土壤 C/N<sup>[23,32]</sup>,致使植物生长速率提高,分解速率变快,营养生长更为旺盛,可以有效提高草地植物 WUE<sup>[33]</sup>。

## 4 结论

重度放牧干扰显著降低中国北方草地生态系统植物水分利用效率,针对不同类型草地,放牧活动对典型草原、高寒草地、草甸草原等 3 种草地生态系统类型水分利用效率存在显著负向效应,对荒漠草原和温性草原存在较弱的正向效应。不同放牧强度对平均效应值具有极显著影响。重度放牧极显著降低草地生态系统植物 WUE。中度放牧对草地生态系统植物 WUE 存在不显著正效应影响,相比于重度和轻度放牧,中度放牧可以提高草地生态系统植物 WUE。土壤 C/N、海拔和年均气温对平均效应值具有显著性影响,均可以较好地解释该研究效应值变异。

### 参考文献:

- [1] 沈芳芳,樊后保,吴建平,等. 植物叶片水平  $\delta^{13}\text{C}$  与水分利用效率的研究进展[J]. 北京林业大学学报,2017,39(11): 114—124.
- [2] 王炜琛. 不同放牧强度对呼伦贝尔草甸草原群落特征及水分利用效率的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2018.
- [3] 贺慧丹,祝景彬,未亚西,等. 牧压梯度下高寒草甸实际蒸散量及植物生产水分有效利用率的研究[J]. 生态环境学报,2017,26(9):1488—1493.
- [4] 刘孝颖. 放牧强度对山西右玉草地生态系统土壤真菌多样性的影响[D]. 北京:中国地质大学,2020.
- [5] 李文,曹文侠,李小龙,等. 放牧管理模式对高寒草甸草原土壤养分特征的影响[J]. 草原与草坪,2016,36(2):8—13.
- [6] 李永强. 不同载畜率对短花针茅荒漠草原土壤风蚀的影响及作用机制[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [7] 张义凡,陈林,李学斌,等. 不同荒漠草原植被根际与非根际土壤养分及碳库管理指数特征[J]. 草业学报,2017,26(8):24—34.
- [8] 刘树敏. 不同放牧压力下大兴安岭西麓草甸草原群落土壤特征及水分利用变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2016.
- [9] 任继周,胡自治,牟新待,等. 草原的综合顺序分类法及其草原发生学意义[J]. 中国草原,1980(1):12—24+38.
- [10] 刘秀梅. 不同放牧强度对荒漠草原土壤特性和地上生物量的影响[J]. 草食家畜,2017(3):45—48.
- [11] 闫瑞瑞,辛晓平,王旭,等. 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应[J]. 生态学报,2014,34(6):1587—1595.
- [12] 贺慧丹,祝景彬,未亚西,等. 牧压梯度下高寒草甸实际蒸散量及植物生产水分有效利用率的研究[J]. 生态环境学报,2017,26(9):1488—1493.
- [13] 王亚婷,王玺,朱国栋,等. 内蒙古短花针茅草原植物水分及氮素利用效率对载畜率的响应[J]. 中国草地学报,2017,39(6):59—64.
- [14] 刘树敏. 不同放牧压力下大兴安岭西麓草甸草原群落土壤特征及水分利用变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2016.
- [15] Varnamkhasti A, Milchunas D, Lauenroth W, *et al.* Production and rain use efficiency in short-grass steppe: grazing history [J]. *Defoliation and Water Resource*, 1995, 6(6):787—796.
- [16] Cavalcante A, Santos P, Junior C, *et al.* Efficiency of water use and nitrogen for goat milk production in irrigated pasture to different management [J]. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 2016, 68(5):1374—1380.
- [17] Li Y, Fan J, Hu Z, *et al.* Comparison of evapotranspiration components and water-use efficiency among different land use patterns of temperate steppe in the Northern China pastoral-farming ecotone [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(6):827—841.
- [18] Gao Y, Marcus G, Gao Q, *et al.* Community Level offset of rain use and transpiration efficiency for a heavily grazed ecosystem in Inner Mongolia grassland [J]. *Plos One*, 2013, 8(9):e74841
- [19] Liu J, Wang X, Gao Y, *et al.* Leaf gas exchange and photosynthesis curves of *Elymus nutans* and *Potentilla anserina* under fencing and grazing conditions in the Qilian

- Mountains, Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(3): 431–445
- [20] 郑云暖. 不同退化程度下典型草原优势植物的水分利用特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [21] 舒锴, 柯浔, 辛莹, 等. 青藏高原多稳态高寒草甸生态系统蒸散特征对比研究[J]. *草原与草坪*, 2019, 39(6): 83–88.
- [22] 吕湾湾. 放牧对典型草原优势植物水分利用率的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [23] Huang X, Luo G, Ye F, *et al.* Effects of grazing on net primary productivity, evapotranspiration and water use efficiency in the grasslands of Xinjiang, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(4): 588–600.
- [24] 李东晓, 王红光, 张迪, 等. 水分亏缺对不同小麦品种矿物质元素吸收分布及水分利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(10): 1475–1484
- [25] 高丽楠, 张宏. 高寒草甸植物水分利用效率研究进展[J]. *草业与畜牧*, 2008(3): 1–5.
- [26] Quan Q, Zhang F, Tian D, *et al.* Transpiration Dominates ecosystem water-use efficiency in response to warming in an alpine meadow[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2): 453–462.
- [27] Wu X, Li X, Chen Y, *et al.* Atmospheric water demand dominates daily variations in water use efficiency in alpine meadows, northeastern Tibetan plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(7): 2174–2185.
- [28] 付刚, 周宇庭, 沈振西, 等. 不同海拔高寒放牧草甸的生态系统呼吸与环境因子的关系[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2789–2794.
- [29] 沈振西, 周楠, 付刚, 等. 围封和放牧条件下藏北高原不同海拔高度高寒草甸植物群落碳氮含量的比较[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 372–376.
- [30] 米兆荣, 陈立同, 张振华, 等. 基于年降水、生长季降水和生长季蒸散的高寒草地水分利用效率[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 649–660.
- [31] 叶辉. 江西省陆地植被净初级生产力及其对降水和气温的响应研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2012.
- [32] 翟夏杰, 黄顶, 王堃. 围封与放牧对典型草原植被和土壤的影响[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(6): 73–78.
- [33] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.

## Effects of grazing on water-use efficiency of grassland ecosystem in northern China

WANG Yun-ying<sup>1,2</sup>, PEI Wei-wei<sup>1,2</sup>, XIN Ying<sup>1</sup>, GUO Xiao-wei<sup>1</sup>, DU Yan-gong<sup>1</sup>

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Analyzing the response of plant water-use efficiency of grassland ecosystems to different grazing intensities is of great significance for improving grassland production and ecological barrier functions. Meta-analysis was conducted by collecting experimental data on the impact of grazing on plant water-use efficiency in 38 grazing experiments conducted on grasslands in northern China. The results showed that the average effect value of grazing on water-use efficiency of grassland plants in northern China was  $-0.18 \pm 0.04$  (95% confidence interval:  $-0.27 \sim -0.10$ ); grazing significantly reduced plant water-use efficiency of grassland ecosystems ( $P < 0.01$ ). The reduction in the average effect value among different types of grassland followed the order of typical grassland > alpine grassland > meadow grassland > temperate grassland > desert grassland. Grazing had extremely significant or significant impact on the average effect value of typical grassland, alpine grassland and meadow grassland, but had no significant impact on desert grassland and temperate grassland. The response of plant water-use efficiency to grazing intensity followed the order of heavy > light > moderate grazing. Heavy grazing extremely significantly reduced plant water use efficiency ( $P < 0.001$ ), moderate grazing improved plant water use efficiency, while light grazing had no significant negative effects. Soil C/N, altitude and annual average tempera-

ture explained 60.88%, 11.81% and 6.45% of the variation of effect value, respectively. Based on the optimization of grazing systems and the restoration of severely degraded grasslands, increasing soil organic carbon content of grassland would improve plant water-use efficiency of grassland ecosystems.

**Key words:** grazing intensity; water use efficiency; meta analysis; random effects model; average effect value

(上接 48 页)

## Effect of potassium application on photosynthetic characteristics and alfalfa resistance to *Odontothrips loti*

LI Ya-shu<sup>1</sup>, WEN Ya-jie<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-dong<sup>1</sup>, ZHOU Sheng-ying<sup>1</sup>,  
HU Gui-xin<sup>1</sup>, SUN Yao-de<sup>2</sup>

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province/Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. Grassland station of Minqin Countr, Minqin 733399, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of potassium application on leaf photosynthetic characteristics of alfalfa and its resistance to *Odontothrips loti*. The study included two alfalfa varieties (*Medicago sativa* cv. Gannong No. 9 and *M. sativa* Gannong No. 3), four potassium (K) levels (40 mg/kg soil, 60 mg/kg soil, 80 mg/kg soil and 100 mg/kg soil), together with nil-K application as the control. The degree of damage in alfalfa was evaluated under different K levels at different periods, meanwhile leaf photosynthetic characteristics and chlorophyll content were measured. The results showed that the damage indexes of alfalfa infested by *O. loti* were reduced significantly with K application, and leaf chlorophyll content increased, but the chlorophyll content of alfalfa became lower along with the more severe damage. When Gannong No. 3 was infested by *O. loti* for 7 days, leaf net photosynthetic rate ( $P_n$ ) and water use efficiency (WUE) increased, and stomatal conductance ( $G_s$ ) increased significantly, the intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) increased significantly except under K1, and the transpiration rate ( $T_r$ ) decreased at all potassium levels except under K4. In Gannong No. 9, leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, and intercellular  $CO_2$  concentration increased significantly, water use efficiency increased, and transpiration rate decreased when alfalfa was infested by *O. loti* for 7 days. Leaf net photosynthetic rate and stomatal conductance of both alfalfa varieties increased significantly, and the transpiration rate decreased when infested by *O. loti* for 14 days, water-use efficiency of Gannong No. 3 increased though not significant, while water-use efficiency of Gannong No. 9 increased significantly. The intercellular  $CO_2$  concentration of Gannong No. 3 increased at all K levels except under K3, and that of Gannong No. 9 decreased significantly except under K4 when alfalfa was infested by *O. loti* for 14 days. Potassium application increased leaf chlorophyll content, net photosynthetic rate of alfalfa, and enhanced alfalfa resistance to thrips.

**Key words:** potassium; alfalfa; *Odontothrips loti*; photosynthesis; resistance to insect