

土壤水分变化对典型草原群落光合作用特征的影响*

刘鹏飞¹,李慧融²,田颖¹,贾成朕¹,王海梅³

(1. 内蒙古自治区气象科学研究所,呼和浩特 010051;

2. 锡林浩特国家气候观象台,内蒙古 锡林浩特 026000;

3. 内蒙古自治区生态与农业气象中心,呼和浩特 010051)

摘要:采用原位控水试验方法模拟土壤水分梯度,分析土壤水分变化对典型草原群落光合作用的影响。研究表明:(1)典型草原群落光合速率和呼吸速率在8月中旬达到最高,之后随牧草的逐渐枯萎,群落光合速率和呼吸速率均呈现逐渐下降趋势;(2)土壤水分减少对典型草原群落光合速率和呼吸速率有抑制作用,9月9日之前,土壤水分减少对群落光合速率的抑制作用更强,而9月2日之前土壤水分减少对群落呼吸速率的抑制作用更强;(3)群落光合速率、呼吸速率、水分利用率与0~10 cm、0~20 cm、0~30 cm土层的土壤水分均显著相关;(4)随着土壤水分减少程度增加,群落光合速率和呼吸速率表现为逐渐下降的趋势,并通过降低水分利用率来增强抗旱能力;(5)通径分析表明,土壤水分是群落光合作用的主要限制因子,并通过间接影响呼吸速率和水分利用率作用于光合作用。研究结果为深入理解典型草原群落对土壤水分胁迫的光合生理响应提供了科学支撑。

关键词:典型草原;光合作用;土壤水分;呼吸作用

中图分类号:S152.7⁺5 **文献标志码:**A

全球气候异常加剧,极端天气事件频发^[1],引起降水和温度格局发生改变,对陆地植物生态系统产生影响。研究表明,1981—2020年内蒙古自治区气温呈上升趋势,而降水量总体变化不明显^[2],随着未来气温的持续升高,气候暖干化特征极有可能出现。温度和水分是影响半干旱地区植被生长的关键因素^[3],在土壤-植被-大气循环系统中,土壤水分是重要环节,也是影响草原植被群落多样性和生态系统功能的重要因素^[4]。有研究表明,水分不足会限制植被对光和热的利用^[5],造成光合作用、呼吸作用下降^[6],物候期发生改变^[7],直接影响植被生产力和固碳能力^[8-9]。吕晓敏等^[10]研究了不同降水对短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)生物量的影响,表明干旱胁迫会导致总生物量减少;尹作天等^[11]分析了石生针茅(*Stipa tianschanica*)光合特性对土壤水分胁迫的响应,表明在干旱胁迫下石生针茅叶片光合速率下降;李林芝^[12]发现干旱胁迫下羊草(*Leymus chinensis*)叶片的净光合速率大幅下降,水分利用率降低;张旭丽等^[13]研究了黄芪(*Astragalus membranaceus*)幼苗的光合生理参数对干旱胁迫的响应,发现随干旱胁迫程度加深,黄芪幼苗的净光合速率呈下降趋势;刘瑞香等^[14]研究发现中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn ssp. *sinensis* Rousi)和俄

* 收稿日期:2024-10-15;修回日期:2025-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(32360295);内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSH0130);内蒙古自治区气象局科学试验和业务平台项目(nmqkxxy202411);青海省科技计划项目(2023-ZJ-733)

作者简介:刘鹏飞(1990—),女,内蒙古乌兰察布人,工程师,硕士。E-mail:liupengfei115@163.com

通信作者:王海梅(1976—),女,内蒙古赤峰人,正高级工程师,博士。主要从事气候变化及生态气象研究。

E-mail:wanghmuhe@126.com

罗斯沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn ssp. *turkestanica* Rousi)×*Hippophae rhamnoides* Linn ssp. *mongolica* cv. Rousi)的光合速率均随土壤水分增加而升高。目前关于土壤水分亏缺对植物光合作用和呼吸作用的影响研究大多集中于单种植物,并且缺少土壤水分渐进式下降过程对植物群落光合观测的研究,这制约着土壤水分胁迫过程对典型草原植物群落光合生理机制的理解。锡林郭勒草原在我国温带草原中具有代表性和典型性,在畜牧业生产中占有重要地位。本研究选择锡林郭勒典型草原为研究样地,通过原位控水试验模拟土壤水分梯度,分析典型草原群落生长随时间和土壤水分梯度的变化规律,揭示群落光合速率和呼吸速率及水分利用率对土壤水分变化的响应,探讨土壤水分变化对典型草原植物群落光合作用的影响,为干旱背景下典型草原植物群落生理生态机制的深入研究提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验样地概况

试验于2023年在内蒙古自治区锡林浩特国家气候观测台野外试验场开展。该地区位于内蒙古典型草原中部,属于温带半干旱大陆性气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥,太阳辐射较强,年均降水量为200~350 mm,年均气温为0~3℃,全年日照时数为2600 h^[15]。优势植物为克氏针茅(*Stipa krylovii*)和羊草,伴生植物有冷蒿(*Artemisia frigida*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、细叶葱(*Allium tenuissimum*)等。

1.2 试验设计

试验以8—10月生长期的典型草原植物群落为研究对象,根据牧草实际发育进程对水分的需求,采用遮雨控水方法,开展3个降水梯度控制试验:25%控水(A)、50%控水(B)、自然降水条件为对照(CK),每个控水处理3次重复。小区面积为2 m×2 m,小区间隔为2 m,每个小区上方安装了3 m×3 m不同遮雨量的遮雨棚,遮雨棚由带孔透光的PC遮雨板组成,降水处理通过调整遮雨板的面积来实现控水比例。为尽可能地减少地下和地表径流对试验结果的影响,小区周围装有高0.3 m、深1 m的隔水铁板。

1.3 试验测定项目和方法

1.3.1 群落光合速率、呼吸速率测定

在不同的控水小区中选择0.5 m×0.5 m的样方,采用LI-6400便携式光合速率仪测定草原群落光合作用,测定参数包括净光合速率(明箱, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、呼吸速率(暗箱, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(明箱, $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。呼吸速率为土壤呼吸速率和植物呼吸速率之和,光合速率由呼吸速率与净光合速率运算得出,水分利用率(WUE)根据净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)计算得到,公式为 $WUE=P_n/T_r$ 。

1.3.2 土壤水分测定

在试验区附近选择具有代表性的地段,测定土壤容重($1.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、田间持水量(24.4%)。采用TDR土壤水分测定仪测定各小区土壤水分,每隔30 min自动观测一次0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm土层的土壤水分。本文土壤水分为重量含水率。

1.3.3 数据分析

采用Excel 2013、SPSS 21.0和Origin 2021软件对观测数据进行统计分析和制图。

2 结果与分析

2.1 不同控水处理对土壤水分变化的影响

各试验小区土壤水分变化与典型草原群落随时间生长规律的波动趋势较为一致,A、B处理与CK处理的土壤水分之间存在显著差异。在0~10 cm土层,CK处理的土壤水分明显高于A、B处理,A处理土壤水分总体上略高于B处理;在10~20 cm和20~30 cm土层,土壤水分变化规律为CK处理>B处理>A处理,且20~30 cm土层CK处理的土壤水分要明显高于A、B处理(图1)。

计算各控水处理0~10 cm、0~20 cm、0~30 cm不同土层的土壤水分均值,将A、B处理土壤水分

均值分别与CK处理土壤水分均值进行差值计算,8月土壤水分均值插值百分比为4.28%、5.91%、6.19%,9月土壤水分均值插值百分比为3.66%、4.31%、4.44%,10月土壤水分均值插值百分比为5.37%、5.33%、6.31%。可见,每个月份中0~30 cm土层A、B处理与CK处理的土壤湿度差异最大。

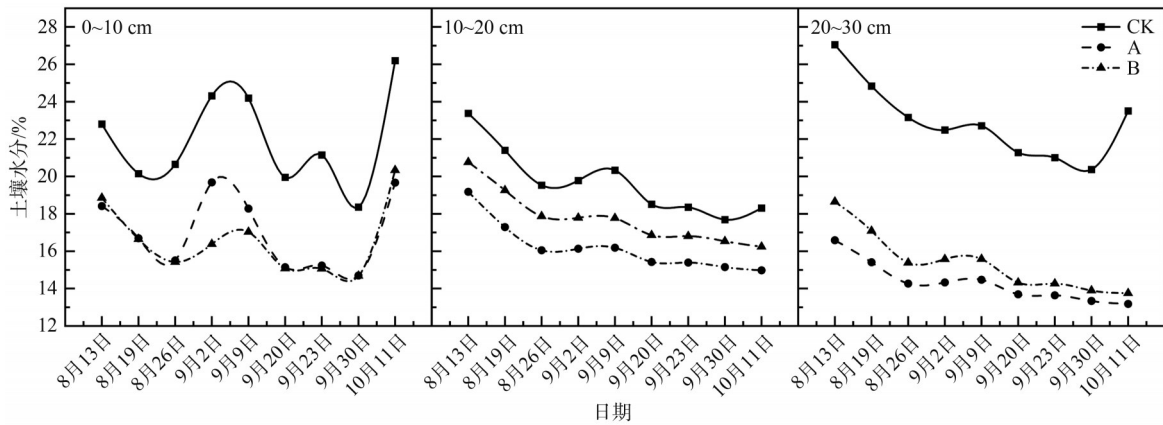


图1 各试验小区不同土层土壤水分动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil moisture in different soil layers in each test plot

2.2 不同水分处理对典型草原群落光合作用的影响

2.2.1 自然水分条件下群落光合速率、呼吸速率变化规律

在CK处理下,群落光合速率和呼吸速率的变化情况与草原植物生长发育规律吻合。光合速率、呼吸速率分别在8月19日达到最高,之后随着牧草逐渐枯黄,群落光合速率、呼吸速率在波动中下降(图2),并在9月23日再次升高至次高峰,之后随着牧草逐渐枯死,群落光合速率、呼吸速率最终在10月11日下降至最低,仅为 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

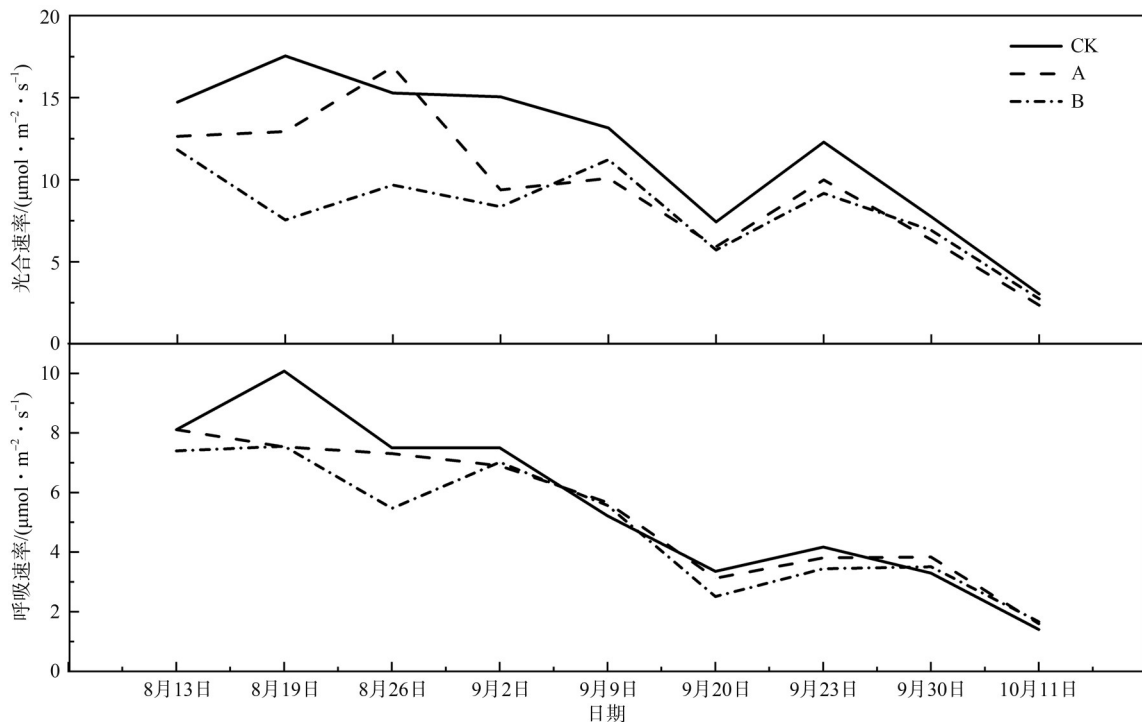


图2 各小区群落光合速率和呼吸速率变化

Fig. 2 Changes of photosynthetic rate and respiratory rate in each test plot

2.2.2 不同控水处理对群落光合速率、呼吸速率的影响

通过对比各小区群落光合速率、呼吸速率变化情况(图2),并分别比较A、B处理光合速率、呼吸速率与CK处理光合速率、呼吸速率的差值(表1)发现:(1)随着土壤水分降低,群落光合速率减小。与CK处理相比,除了8月下旬A处理的光合速率略高于CK处理外,其余日期A、B处理的光合速率均较CK处理偏低;9月9日之前,土壤水分胁迫对群落光合速率的抑制作用更明显;8月19日,A、B处理群落的呼吸速率与CK处理群落的呼吸速率的差值平均值达到 $7.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;9月9日之后,随着牧草的逐渐枯黄,A、B处理与CK处理的群落光合速率差异明显减小,最终随着牧草枯死各控水处理的群落光合速率趋于一致。(2)土壤水分减少对群落呼吸速率有一定的影响。与CK处理相比,9月2日之前,土壤水分减少对群落呼吸速率的抑制作用明显,A、B处理的呼吸速率均显著低于CK处理;8月19日,A、B处理群落的呼吸速率与CK处理群落的呼吸速率的差值平均值达到 $2.54 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;9月2日之后,A、B处理对群落呼吸速率的影响较小,其呼吸速率与CK处理趋于一致。(3)群落光合速率、呼吸速率对土壤水分存在滞后效应。各控水处理的群落光合速率和呼吸速率均在9月23日达到次高峰,一方面是因为水分是光合作用的原料之一,各控水处理的土壤水分在9月20日之后又缓慢回升;另一方面由于各控水处理的土壤水分在9月9日显著回升至次高峰,虽然9月已处于牧草生长枯黄末期,土壤水分的改善仍然对牧草生长发育起到了积极作用,但牧草对土壤水分的响应存在时间上的滞后,因此,约半个月之后牧草群落光合速率和呼吸速率显著提升。

表1 不同控水处理(A/B)的光合速率和呼吸速率与自然对照处理(CK)的光合速率和呼吸速率差值比较

Table 1 Comparison of photosynthetic rate and respiratory rate between different water control treatments (A/B) and natural control treatment (CK)

指标	日期									
	8月 13日	8月 19日	8月 26日	9月 2日	9月 9日	9月 20日	9月 23日	9月 30日	10月 11日	
光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	A与CK差值	-2.09	-4.62	1.58	-5.67	-3.07	-1.50	-2.29	-1.41	-0.68
	B与CK差值	-2.91	-10.00	-5.61	-6.70	-1.93	-1.71	-3.12	-0.84	-0.28
	差值平均值	-2.50	-7.31	-2.01	-6.19	-2.50	-1.61	-2.71	-1.12	-0.48
呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	A与CK差值	0.01	-2.55	-0.20	-0.60	0.44	-0.23	-0.37	0.54	0.19
	B与CK差值	-0.70	-2.52	-2.03	-0.48	0.35	-0.85	-0.72	0.21	0.26
	差值平均值	-0.35	-2.54	-1.11	-0.54	0.40	-0.54	-0.55	0.38	0.22

2.3 典型草原群落光合特征对土壤水分变化的响应

2.3.1 群落光合速率和呼吸速率与水分利用率随土壤水分的变化规律

为进一步分析土壤水分变化对典型草原群落光合速率和呼吸速率的影响规律,将试验观测到的光合速率、呼吸速率按照土壤水分逐渐增加的顺序进行排序,并分别建立光合速率和呼吸速率与土壤含水量的回归方程,如图3(a)、(b)所示。由图3可知,随着0~10 cm、0~20 cm、0~30 cm土层土壤水分的增加,各土层群落光合速率和呼吸速率均表现为逐渐增加的趋势,土壤水分与群落光合速率、呼吸速率均具有一定的线性回归关系。

在0~10 cm、0~20 cm、0~30 cm土层,随着土壤水分的减少,各土层群落水分利用率呈指数缓慢下降,如图3(c)所示。伴随土壤水分减少程度的加剧,草原植物群落会通过降低水分利用率来提升抗旱能力。

2.3.2 群落光合速率、呼吸速率和水分利用率与土壤水分的相关性分析

群落光合速率、呼吸速率和水分利用率与各土层土壤水分均显著相关。根据对各水分处理小区牧草群落光合速率、呼吸速率和水分利用率与实测土壤水分数据相关性结果分析(表2),10~20 cm

土层土壤水分与群落光合速率、呼吸速率、水分利用率的相关性最高,这是因为根系集中分布在10~20 cm土层,植物对土壤中的养分利用率最高,有助于光合作用和呼吸作用。可见,土壤水分是影响牧草群落光合作用、呼吸作用的重要因素。

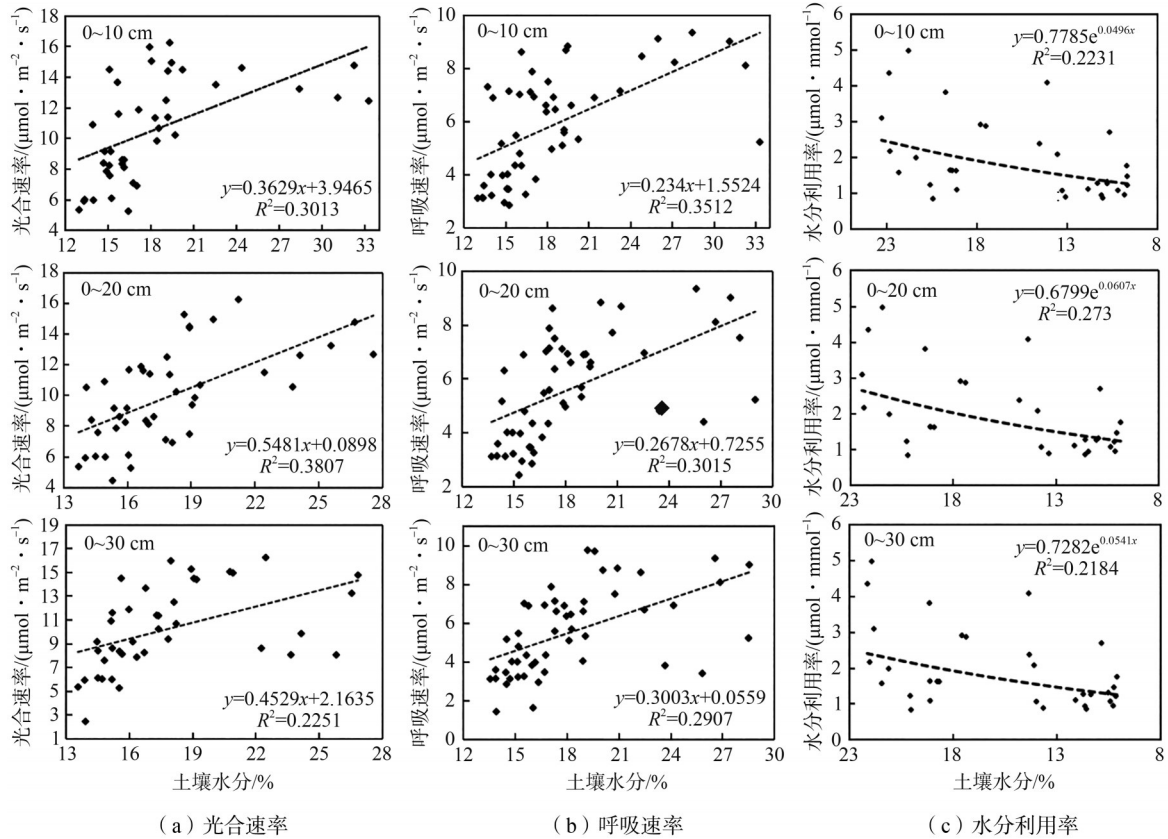


图3 群落光合速率、呼吸速率、水分利用率随土壤水分的变化

Fig. 3 Changes of steppe community photosynthetic rate, respiration rate and water use efficiency with soil moisture

表2 群落光合速率和呼吸速率与土壤水分的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of photosynthetic rate and respiration rate with soil moisture

项目	土层深度/cm			项目	土层深度/cm		
	0~10	10~20	20~30		0~10	10~20	20~30
光合速率	0.405**	0.558**	0.338*	呼吸速率	0.521**	0.649**	0.548**
水分利用率	0.463**	0.533**	0.465**				

注:*代表显著性水平0.05;**代表显著性水平0.01。

2.4 土壤水分变化对典型草原群落光合特征的通径分析

为深入探讨土壤水分影响下的典型草原群落光合作用机制,借助通径分析,研究土壤水分变化对群落光合作用的影响机制(表3)。结果表明,群落土壤水分、呼吸速率、水分利用率对光合作用的解释率为73.6%,且影响光合作用最大的直接作用因子为呼吸速率,直接通径系数为0.8,表明呼吸速率会对光合作用产生显著的正向影响,植物呼吸作用与光合作用是相互依存的关系;水分利用率对光合作用的直接通径系数为0.157,呈现显著正向影响关系,水分利用率是净光合速率与蒸腾速率的比值,其对光合作用的影响较大;土壤水分对光合作用的直接通径系数为0.031,土壤水分通过影响呼吸速率间接影响光合作用的通径系数为0.212,通过影响水分利用率间接影响光合作用的通径系数为0.007。可见,土壤水分变化对植物群落光合速率、呼吸速率和水分利用率均有影响,并通

过影响呼吸速率和水分利用率来影响光合作用,总体来说,土壤水分是群落进行光合作用的影响因子。

表3 土壤水分变化对群落光合作用的通径分析

Table 3 Path analysis of effects of soil moisture change on steppe community photosynthesis

因子	直接通径系数	间接通径系数		
		土壤水分-光合速率	呼吸速率-光合速率	水分利用率-光合速率
土壤水分	0.031		0.008	0.001
呼吸速率	0.800	0.212		0.180
水分利用率	0.157	0.007	0.035	

3 讨论

气候暖干化是未来全球气候变化的主要特征^[16],将影响土壤的理化性质和植物生理特征,从而影响整个生态系统。自然降水的减少会引起土壤水分降低,影响草原植物群落的光合作用和呼吸作用,而光合作用和呼吸作用是草原植被生长发育的生理基础^[17]。本文研究表明,群落光合速率、呼吸速率随干旱时间推移整体呈下降趋势,土壤水分与群落光合速率、呼吸速率显著相关。相关研究也表明,随土壤水分胁迫程度的增加,植物的光合作用和呼吸作用均受到抑制^[18]。

环境因素是植物生长发育的关键,也是植物生理生态特征发生变化的重要原因。水分是限制植物进行光合作用的重要因素,降水增加使植物光合速率上升;相反,植物生长过程中,水分减少将导致植物光合速率下降^[19-21]。究其原因,有学者认为,植物进行光合作用离不开叶绿素,干旱状态下植物处于缺水状态,叶片叶绿素合成受阻,甚至受到损伤^[22-23],故叶绿素的合成减少是造成植物光合速率下降的主要原因;另有学者认为,干旱影响植物叶片气孔开放,进而限制CO₂进入叶片参与光合作用,造成植物叶片净光合速率降低^[24-27]。本研究表明,土壤水分下降导致植物群落的呼吸速率下降,呼吸速率反映的是植物消耗光合作用产物的过程,当土壤水分降低时,植物会通过降低光合速率得到的光合产物来适应不利环境带来的影响,因此,干旱时植物群落呼吸速率的变化规律与光合速率表现一致。

前人研究显示,多数植物在轻度干旱时水分利用率会先增加,之后随干旱加剧开始下降^[28-29],本研究结果与前人研究结果存在差异:土壤水分降低时,草原群落水分利用率下降速度逐渐减缓。一方面是由于研究期为8—10月,这一时期植物本身的生理生态特征处于逐渐衰减的趋势,叶片和根系活性以及植物的光合速率、呼吸速率均出现下降,在一定程度上会影响植物群落土壤水分减少状态下水分利用率的变化;另一方面是由于研究区典型草原群落包含的植物种类不同,不同植物的生存适应策略存在差异,有研究表明一些植物在受到干旱胁迫时可能选择缩短生命周期或者减缓生长等方式来适应干旱条件^[30-31]。总体来说,草原植物群落水分利用率的下降速度减缓是植物为适应干旱而做出的改变。

通径分析表明,土壤水分除了直接影响群落光合作用外,还会通过影响呼吸速率和水分利用率间接影响群落光合作用。大多研究表明,土壤水分胁迫对植物呼吸速率和水分利用率均存在不同程度的影响^[32-33],而呼吸速率、水分利用率作为植物生长的重要生理生态参数,对植物的光合作用及植株的生长存在较大影响,可见通径分析的结果符合土壤水分胁迫影响植物群落光合生理特性的变化规律,也间接说明土壤水分对植物群落光合作用的影响机制。

4 结论

本研究利用土壤水分控制试验,将环境因子与植物光合生理因子联系起来,分析土壤水分变化对典型草原植物群落光合作用的响应机制。研究表明:(1)典型草原群落光合速率、呼吸速率随

牧草的枯萎呈下降趋势,土壤水分胁迫对典型草原群落光合速率和呼吸速率有显著的抑制作用;(2)典型草原群落光合速率、呼吸速率、水分利用率均与土壤水分显著相关,群落水分利用率会随土壤水分的减少而降低;(3)土壤水分通过直接和间接双重作用影响草原群落光合作用。

参考文献:

- [1] LI Y, WANG Y H, SONG J M. Trends in extreme climatic indices across the temperate steppes of China from 1961 to 2013[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(3): 485-497.
- [2] 李璐. 1981—2020年内蒙古气温、降水变化特征分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 2025, 42(2): 51-53.
- [3] BARNABÁS B, JÄGER K, FEHÉR A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2008, 31(1): 11-38.
- [4] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [5] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [6] 刘仪莹, 杨紫萌, 李国芳, 等. 不同水分条件下西鄂尔多斯三种荒漠灌木光合生理特征[J]. *中央民族大学学报(自然科学版)*, 2022, 31(3): 25-31.
- [7] 胡植, 王焕炯, 戴君虎, 等. 利用控制实验研究植物物候对气候变化的响应综述[J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9119-9129.
- [8] 赵晶晶, 刘良云. 物候变化对北美温带落叶阔叶林生态系统生产力的影响[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(5): 363-371.
- [9] RICHARDSON A D, KEENAN T F, MIGLIAVACCA M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156-173.
- [10] 吕晓敏, 王玉辉, 周广胜, 等. 温度与降水协同作用对短花针茅生物量及其分配的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 752-760.
- [11] 尹作天, 王玉辉, 周广胜, 等. 荒漠草原石生针茅光合特性对渐进式土壤干旱过程的响应及敏感性分析[J]. *草业学报*, 2022, 31(1): 81-94.
- [12] 李林芝. 呼伦贝尔草甸草原不同土壤水分梯度下羊草光合生理特性研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [13] 张旭丽, 王瑞军, 郝小倩, 等. 干旱胁迫及复水对黄芪幼苗生长、生理特性及次生代谢产物积累的影响[J]. *作物杂志*, 2024, (5): 204-211.
- [14] 刘瑞香, 杨劼, 高丽. 不同土壤水分条件对中国沙棘和俄罗斯沙棘的光合和蒸腾作用的影响[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2006, 37(2): 163-169.
- [15] 汪文雅, 郭建侠, 王英舜, 等. 锡林浩特草原CO₂通量特征及其影响因素分析[J]. *气象科学*, 2015, 35(1): 100-107.
- [16] IPCC. *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [17] 陈雨森, 孙祚洋, 郭军玲, 等. 渐进性干旱胁迫下黄芩生理特性及活性成分响应[J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(6): 52-60.
- [18] 王海梅, 贾成朕, 李慧融, 等. 水分胁迫对典型草原植物群体光合作用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 237-242.
- [19] 王思琪, 周广胜, 周梦子, 等. 增温背景下克氏针茅枯黄期物候对降水响应的光合生理机制[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 845-852.
- [20] 顾文杰, 周广胜, 吕晓敏, 等. 克氏针茅物候对气候变暖和水分变化的响应及其光合生理生态机制[J]. *生态学报*, 2022, 42(20): 8322-8330.
- [21] 刘志勇, 吴晓光, 徐智超, 等. 乌梁素海湖滨湿地不同植物群落生态系统光合/呼吸动态研究[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4): 408-415.
- [22] MOUSTAKAS M, CALATAYUD Á, GUIDI L. Editorial: Chlorophyll fluorescence imaging analysis in biotic and abiotic stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 658500.
- [23] 陈晓林, 陈星宏, 马梦雨, 等. 不同水分处理对甘平果实裂果及相关生理特性的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(6): 74-87.
- [24] FARQUHAR G D, SHAREKY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1982, 33: 317-345.

- [25] YANG X, LU M, WANG Y, et al. Response mechanism of plants to drought stress [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(3):50.
- [26] 张斌,李从娟,易光平等. 梭梭和头状沙拐枣形态及生理生化特性对干旱胁迫的响应[J]. *干旱区研究*, 2024;41(7):1177-1184.
- [27] CHAVES M M, MAROCO J P, PEREIRA J S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant [J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30:239-264.
- [28] MANZONI S, VICO G, KATUL G, et al. Optimizing stomatal conductance for maximum carbon gain under water stress: A meta-analysis across plant functional types and climates [J]. *Functional Ecology*, 2011, 25:456-467.
- [29] 朱婧,聂水,刘思,等. 4种木本园林植物水分胁迫生理响应及耐旱性评价[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(23):7867-7883.
- [30] 曹生奎,冯起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. *生态学报*, 2009, 29(7):3882-3892.
- [31] 张颖娟,贾倩,马娟. 珍稀灌木绵刺与四合木光合特征的比较[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(6):629-636.
- [32] 胡啸,吕晓东,赵福年. 土壤干旱过程中玉米叶片光响应特征及其模拟[J/OL]. *甘肃农业大学学报*, 1-10. [2025-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20231206.0907.002.html>.
- [33] 赵娜,吕建魁,李少宁,等. 不同干旱处理刺槐、侧柏光合特性与内源脱落酸含量的相关关系[J]. *生态学报*, 2024, 44(5):2100-2114.

(责任编辑 张 庆)

Effects of Soil Moisture Change on Photosynthesis in Typical Steppe Community

LIU Pengfei¹, LI Huirong², TIAN Ying¹, JIA Chengzhen¹, WANG Haimei³

(1. *Inner Mongolia Institute of Meteorological Sciences, Hohhot 010051, China;*

2. *Xilinhot National Climatological Observatory, Xilinhot 026000, China;*

3. *Inner Mongolia Ecological and Agricultural Meteorological Center, Hohhot 010051, China*)

Abstract: The effects of different levels soil moisture changes on community photosynthesis and its mechanism were analyzed by simulating soil droughts based on in-situ water control experiment, taking the typical steppe community of Xilingol grassland as study area. The results showed that: (1) The photosynthetic rate and respiratory rate of the typical steppe community reached the highest value in mid-August, and then declined gradually with the wilting of herbage. (2) The reduction of soil water had a significant inhibitory effect on the community photosynthetic rate and respiratory rate. It had a stronger inhibitory effect on the community photosynthetic rate before September 9th, and had a stronger inhibitory effect on the community respiratory rate before September 2nd. (3) The community photosynthetic rate, respiration rate and water use efficiency were significantly correlated with soil water content in 0—10 cm, 0—20 cm and 0—30 cm soil layers. (4) As soil moisture decreased, the photosynthetic rate and respiratory rate of the community showed a declining trend, and the community could improve its drought resistance ability by reducing water use efficiency. (5) Path analysis results showed that soil water was the limiting factor of community photosynthetic respiration, and it indirectly affects the rate of respiration and water use efficiency by affecting photosynthesis. These findings provide scientific support for understanding the photosynthetic physiological response mechanisms of typical steppe community to soil moisture stress.

Key words: typical steppe; photosynthesis; soil moisture; respiration