

DOI: 10.5846/stxb201804230921

于瑞鑫,王磊,杨新国,陈林,蒋齐,王兴,陈娟.平茬柠条的土壤水分动态及生理特征研究.生态学报,2019,39(19): - .

Yu R X, Wang L, Yang X G, Chen L, Jiang Q, Wang X, Chen J. Soil moisture dynamics and physiological characteristics of moving of *Caragana intermedia*. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

## 平茬柠条的土壤水分动态及生理特征研究

于瑞鑫<sup>1</sup>, 王磊<sup>1,2,\*</sup>, 杨新国<sup>1</sup>, 陈林<sup>1</sup>, 蒋齐<sup>3</sup>, 王兴<sup>1</sup>, 陈娟<sup>1</sup>

1 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093

3 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002

**摘要:**平茬作为荒漠草原区柠条林优化管理的重要手段之一,深入探究平茬复壮阶段的土壤水分的恢复状况及其对生理特征的影响具有十分重要的意义。通过设置对比试验,研究了不同平茬年限柠条的土壤水分的时空分布及其周期性变化规律,并分析了其对净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率等光合作用生理特征的影响,结果表明:(1)生长季年内变化,PC1a—PC5a 柠条在对土壤水分的保持能力均高于 WPC 柠条;对比不同平茬年限柠条土壤水分,PC3a 增长迅速,PC4a 水分条件最优,PC5a 土壤水分消退逐渐向 WPC 柠条的土壤水分接近;土壤垂直剖面上,PC1a—PC4a 柠条根系活跃区的土壤水分随着平茬年份的增加,深层的土壤水分得到有效改善,到 PC5a 时开始回落。(2)不同平茬年限土壤含水量变化剧烈程度分别为 PC4a>PC5a>WPC>PC2a>PC3a>PC1a,且平茬措施对非根系活跃区的深层土壤水分影响不大,平茬后,对 0—180cm 土层深度的影响显著,且以平茬 PC4a 和 PC5a 的土壤水分周期性变化最长,振动强度变化最明显。(3)平茬早期(PC1a—PC2a)的土壤水分并未迅速提高,此阶段柠条的光合作用受自身性状的影响大于对土壤水分的影响;平茬中期(PC3a—PC4a)的土壤水分对光合作用的影响大于柠条的补偿生长作用;平茬后期(PC5a),平茬柠条光合作用减弱及性状几乎不发生变化,土壤水分状况也开始接近 WPC 柠条。因此,对于荒漠草原平茬复壮阶段的柠条林的科学有效管理,PC5a 柠条可作为饲草资源进行利用的最佳时段。

**关键词:**荒漠草原;柠条;平茬年限;土壤水分动态;周期变化;生理特征

## Soil moisture dynamics and physiological characteristics of moving of *Caragana intermedia*

YU Ruixin<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1,2,\*</sup>, Yang Xinguo<sup>1</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, JIANG Qi<sup>3</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, CHEN Juan<sup>1</sup>

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing university, Nanjing 210093, China

3 Desert Institute of Academy of Agriculture and Forestry Sciences of Ningxia, Yinchuan 750002, China

**Abstract:** As one of the important means to optimize management of *Caragana intermedia* forest in the desert steppe, moving is of great significance to further explore recovery of soil moisture and its influence on physiological characteristics during the renew stage. By comparative experiments, the temporal and spatial distribution of soil moisture and its cyclical variation of *Caragana intermedia* were studied in different moving years. The effects of net photosynthetic rate, transpiration rate, and water use efficiency on photosynthesis physiological characteristics were analyzed. The results showed that: (1) During the growing season, the maintenance of PC1a—PC5a was higher than that of WPC. Compared to soil moisture of *Caragana intermedia* in different mowing years, PC3a increased rapidly and PC4a had the optimal moisture condition. The

**基金项目:**国家自然科学基金(31760707, 41461046, 31460161);国家重点研发计划(2016YFC0500709);中央引导地方科技发展专项(YDZX20176400002662);宁夏回族自治区西部一流学科建设项目(NXYLXK2017B06)

**收稿日期:**2018-04-23; **网络出版日期:**2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: WL8999@163.com

soil moisture of PC5a gradually subsided to the soil moisture of WPC. In the vertical section of the soil, the soil moisture in the deep layer was effectively improved with the soil moisture in the active area of PC1a—PC4a roots increase in different mowing years. However, the soil moisture began to fall back in PC5a. (2) Intensity changes of soil moisture in different mowing years was PC4a>PC5a>WPC>PC2a>PC3a>PC1a, and the moving measures have little effect on the deep soil moisture in the non-root activity area. The effect in 0—180cm soil depth was significant, while the soil moisture cyclical variation and the vibration intensity changed very obviously in PC4a and PC5a. (3) The soil moisture in the early stage of moving (PC1a—PC2a) did not increase rapidly. At this stage, the photosynthesis of *Caragana intermedia* was affected by its own traits more than the soil moisture. The effect of soil moisture on photosynthesis in the mid-moving period (PC3a—PC4a) was greater than the compensatory growth of *Caragana intermedia*. In the late stage of moving (PC5a), the photosynthesis of moving *Caragana intermedia* decreased and the traits hardly changed. The soil moisture status also began to approach WPC. Therefore, PC5a can be used as the best time of forage resources utilization for the scientific and effective management of *Caragana intermedia* forest in the stage of renew of desert steppe.

**Key Words:** Desert Steppe; *Caragana intermedia*; Moving years; Soil Moisture Dynamics; Cyclical Variation; Physiological Characteristics

宁夏荒漠草原区地处干旱半干旱农牧交错区,是重要的畜牧业生产基地和我国两屏三带生态建设关键区域<sup>[1]</sup>,该地区土壤长期干旱,植被自我恢复能力较弱,因此,人工种植旱生灌木进行恢复植被已成为荒漠草原生态环境恢复的重要手段<sup>[2]</sup>。中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)属豆科锦鸡儿属植物,对极端条件的地区有较强的适应能力。因此,在宁夏荒漠草原区广泛种着柠条灌木林,截止至2016年,宁夏中部干旱带现有柠条面积26.0735万hm<sup>2</sup>,地上冠层生物量140.79万t,为荒漠草原水土保持、防风固沙做出了突出贡献,也为当地舍饲羊只提供了优质的饲草资源。但是,柠条林在生长6—8a后,开始出现不同程度衰退现象,柠条林的平茬复壮措施使柠条立地土壤水分状况得到了改善<sup>[3]</sup>,而土壤水分状况的改变直接影响了植物叶片的光合作用<sup>[4-7]</sup>,进而影响植物的生物量和生产力。但是,关于柠条平茬后复壮阶段的土壤水分变化规律,及如何影响柠条补偿生长和光合作用的探讨鲜有报道。

已有研究表明,随荒漠草原区人工柠条林林龄的不断增加,在长期受干旱胁迫状况下,土壤水分仍能保持周期性变化规律,且在不断寻求新的平衡过程<sup>[8]</sup>,梁海滨等<sup>[9]</sup>在对不同林龄的柠条的土壤水分季节性变化的研究中发现,随着季节的变化呈现先上升后下降再上升的变化趋势,而在不同林龄柠条的光合作用及水分利用状况的对比中发现,干旱胁迫下,幼龄柠条通过降低气孔导度减少水分散失,保证光合作用的进行,中龄和老龄柠条则提高水分利用效率来使水分利用最大化,但降低了植物光合作用能力,导致了柠条生长减缓和衰退<sup>[10]</sup>。因此,对植物地上部分进行干扰,可以有效改善立地土壤水分、土壤全氮以及有机质含量等特性<sup>[11-13]</sup>,对柠条进行平茬处理后,柠条所处的水分条件发生改变,因此成为柠条复壮的主要机制之一,平茬后柠条受干旱胁迫程度减弱,根冠比发生变化,光系统II活性提高,光合速率加快,更多的光能得到有效利用<sup>[14]</sup>,而平茬措施对柠条光合作用的影响因生育期而异,早期平茬措施对柠条同时产生消极的生理影响和积极的土壤水分效应则互为响应<sup>[3]</sup>。因此,研究不同平茬年限柠条对土壤水分影响及周期性变化规律,探索不同平茬年限柠条的光合作用的差异,试图解释壤水分动态和生物量特征的差异对柠条光合作用的影响,为柠条灌木资源在干旱、半干旱区的合理利用、科学开发提供提供可靠的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏吴忠市盐池县皖记沟村(37°04′—38°10′N,106°30′—107°47′E),该地区为典型的中温带大陆性气候。年日照时数为2863h,年平均太阳辐射总量571.1—609.6 kJ·cm<sup>2</sup>,年平均气温8.2℃,年降水量

约在 250—350mm,多集中于 7—9 月份,年均蒸发量高达 2139mm,年均无霜期为 160d,冬春两季风大沙多,年均风速为  $2.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 1.2 试验地选择

研究区内选取 35a 林龄的人工柠条林地 6 块,平茬处理形成了平茬 1 年(PC1a)、平茬 2 年(PC2a)、平茬 3 年(PC3a)、平茬 4 年(PC4a)、平茬 5 年(PC5a)和未平茬(WPC)6 个样地序列。选取的样地具有代表性,同平茬年限柠条地块间的最大距离为 910m,柠条林的带间距均为 6m,地形地貌、土壤类型相同,平茬前柠条林长势相同且具有较高一致性,平茬处理后的柠条林长势良好。

## 1.3 试验地植被生长特征及土壤性质

试验地内土壤类型主要为土壤肥力较低、结构松散、含沙量大,易受风蚀而沙化的灰钙土、风沙土等。试验区内有大面积围封草场,以人工栽培柠条林为主,林下植被以短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等草本植物为主。对各样地和不同处理的柠条土壤性质和生长特征进行比较(见表 1),不同平茬年限的柠条,冠幅、株高、新梢长的个体差异较大,平茬初期柠条增长迅速,到 PC3a 时生长速度进一步加快,到达一定高度时,生长速度开始减缓,PC4a 柠条相对于其他平茬年限柠条的生长状况最好;样地地表平坦,土壤的机械组成及土壤全氮、全碳含量基本不存在差异性。

表 1 不同平茬年限样地柠条生长特征和土壤性质

Table 1 Growth characteristics and soil properties of *Caragana intermedia* site with different mowing years

不同平茬年限 Different mowing years	土层深度 Soil depth/cm	土壤性质 Soil Properties						生长特征 Growth Characteristics		
		黏粉粒 Clay+Silt	细砂粒 Fine sand	粗砂粒 Coarse sand	全氮 Total nitrogen/%	全碳 Total carbon/%	碳氮比 C/N	株高 Height/cm	新梢长 New treetop length/cm	冠幅 Crown/cm <sup>2</sup>
未平茬 WPC	0—20	1.51	50.89	47.56	0.05	1.14	21.31	117	10	24860
	20—40	1.65	45.98	52.37	0.04	0.91	24.73			
	40—60	1.44	37.89	60.67	0.03	0.90	26.90			
平茬 1 年 PC1a	0—20	1.43	49.14	49.37	0.05	0.78	16.79	48	38	11183
	20—40	1.58	47.35	51.08	0.05	0.70	14.93			
	40—60	2.69	57.25	40.07	0.06	0.79	13.94			
平茬 2 年 PC2a	0—20	1.61	50.59	49.46	0.04	1.18	22.35	60	28	12718
	20—40	1.68	44.78	53.67	0.06	0.89	24.63			
	40—60	1.24	38.88	62.68	0.02	0.91	26.80			
平茬 3 年 PC3a	0—20	1.54	51.89	46.59	0.05	1.17	23.37	92	28	18240
	20—40	1.66	46.08	54.34	0.05	0.71	22.75			
	40—60	1.54	37.90	61.59	0.04	0.80	25.71			
平茬 4 年 PC4a	0—20	1.33	52.10	46.58	0.05	0.78	17.22	93	20	19540
	20—40	2.97	60.70	36.34	0.06	0.78	13.00			
	40—60	4.25	67.94	27.82	0.08	0.91	11.31			
平茬 5 年 PC5a	0—20	1.49	45.42	53.05	0.04	0.77	17.77	99	20	20176
	20—40	1.40	43.81	54.75	0.03	0.77	23.00			
	40—60	1.28	37.69	60.93	0.03	0.64	24.00			

## 1.4 研究方法

### 1.4.1 测定方法

柠条生长特征及土壤理化性质测定:随机选取不同平茬年限及未平茬柠条 5 株,每株对冠幅( $\text{cm}^2$ )、株高(cm)、新梢长(cm)进行测量;采用激光粒度仪(Mastersizer 3000, Malvern Panalytical,)对选取样地内的土壤粒径进行测定;使用元素分析仪(Elemental Analyzer, Vario MACRO)测定土壤中的全碳、全氮含量。

土壤水分测定:采用 TRIME-T3 TDR 测量系统分别于当年 4—10 月,测量周期为 10d,在距地表 0—

20cm、20—40cm、40—60cm、60—80cm、80—100cm、……280—300cm 处对不同平茬年限柠条进行测量,每层沿不同方向测量 3 次做统计分析。

光合作用测定:选取 7 月中旬晴朗无云的天气,10:00—16:00 每隔 2h,利用 CIRAS-2 便携式光合系统对不同平茬年限长势良好的柠条的光合作用日变化进行测定。在已选取的 5 株柠条中,每株选取长势相同的枝条 3 枝进行测量,并保存至系统中进行统计,得到净光合速率(Net photosynthetic rate,  $P_n$ )、蒸腾速率(Transpiration rate,  $T_r$ )、气孔导度(Stomatal conductance,  $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度(Intercellular  $CO_2$  concentration,  $C_i$ )、大气  $CO_2$  浓度(Atmospheric  $CO_2$  concentration,  $C_a$ )、气温(Atmospheric temperature,  $T_a$ )、光合有效辐射(Photosynthetically active radiation,  $PAR$ )等参数,计算出水分利用效率(Water use efficiency,  $WUE = P_n \cdot T_r^{-1}$ )。

#### 1.4.2 统计分析

采用 Microsoft Excel 2016、IBM SPSS Statistics 20.0 等统计软件对数据进行统计分析和作图,不同平茬年限之间差异性采用 one-way ANOVA 进行方差分析,用 LSD 法进行多重比较<sup>[15]</sup>;利用 Matlab 软件自带的小波工具包进行小波变换<sup>[16]</sup>;利用 surfer 11 生成土壤水分时空格局分布插值图及小波变换系数实部等值线图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同平茬年限柠条土壤水分时空变化特征

在生长季内,不同平茬年限柠条及对照未平茬柠条土壤含水量随季节变化特征受降雨、柠条光合作用需水等因素共同作用,年内整体为“W”型的变化趋势(见图 1),总体表现为 4—6 月开始下降,6—7 月逐渐上升,7—9 月再次下降,9—10 月再次上升,在整个生长季内对土壤水分的保持能力均高于 WPC 柠条。PC1a 柠条土壤水分状况基本与 WPC 一致,随着土壤深度的增加呈现先升高后降低的趋势,各层土壤含水量维持在 5%—8%之间,深层土壤水分基本不受生长季变化的影响,只有表层 0—20cm、20—40cm、40—60cm 的土壤水分变化幅度变化较明显,中层土壤含水量较小,降至 5%—6%,70cm 以下土壤水分几乎没有发生改变,各土层深度的水分较稳定;PC2a 柠条土壤水分随着土层深度的增加土壤含水量开始改善,保持在 6%—10%之间,较于 PC1a 在 20—100cm 处的土壤的水分状况变化明显,表层及 100cm 以下的土壤水分含量变化不明显,80—180cm 中层的土壤水分产生影响,减弱了中层土壤的旱化程度;PC3a 柠条的土壤水分总体呈现上升的变化趋势,保持在 7%—15%之间,280—300cm 处的土壤水分达到最大值 14.99%,但年内变化在 8%—10%之间变化较剧烈,6 月—8 月的变化与其他平茬年份相比波动明显,中层的土壤水分略有下降,但深层的土壤水分状况有了明显改善;PC4a 在 0—220cm 土层随着土壤深度的增加呈现出先降低后升高的趋势,保持在 5%—18%之间,200cm 处水分含量最低为 5.86%,且表层 0—60cm 处的水分与 PC3a 基本保持一致,而中层及深层的土壤水分显著高于其他平茬年份,80—180cm 的土壤水分状况最佳,维持在 10%—13%,180cm—300cm 的土壤水分则维持在 10%—18%之间;PC5a 柠条土壤水分呈现逐渐降低的趋势,保持在 5%—10%之间,80—180cm、180—300cm 处的土壤水分基本与 WPC 柠条土壤水分状况一致,表层的土壤水分则略高于 WPC 柠条。

### 2.2 不同平茬年限人工柠条林土壤水分小波分析

根据不同剖面深度小波变换系数实部等值线图(见图 2)能够明显看出,土壤含水量演化过程中存在周期性振荡特征,不同平茬年限土壤含水量变化剧烈程度分别为  $PC4a > PC5a > WPC > PC2a > PC3a > PC1a$ 。不同平茬年限土壤含水量演变过程中 0—40cm 存在 3 个周期性变化规律(100—200d、250—350d、500—600d),40—180cm 存在 2 个周期性变化规律(250—350d、400—500d),180—300cm 存在 1 个周期性变化规律(400—600d),另外,在 PC4a—PC5a 时间尺度上存在 1 个周期性变化规律(150—350d)。在本研究时段内,土壤水分正负位相交替出现,同时该尺度在不同土层深度的周期变换均表现地十分稳定,具备全域性。随着土层深度的增加,不同平茬年柠条的土壤水分振动周期不断扩大。180—300cm 土层深度处存在 3 个偏少中心,存在 4 个偏多中心,深层的振动强度剧烈但周期保持稳定,说明其受不同平茬年限柠条的水分利用的影响较小;表层

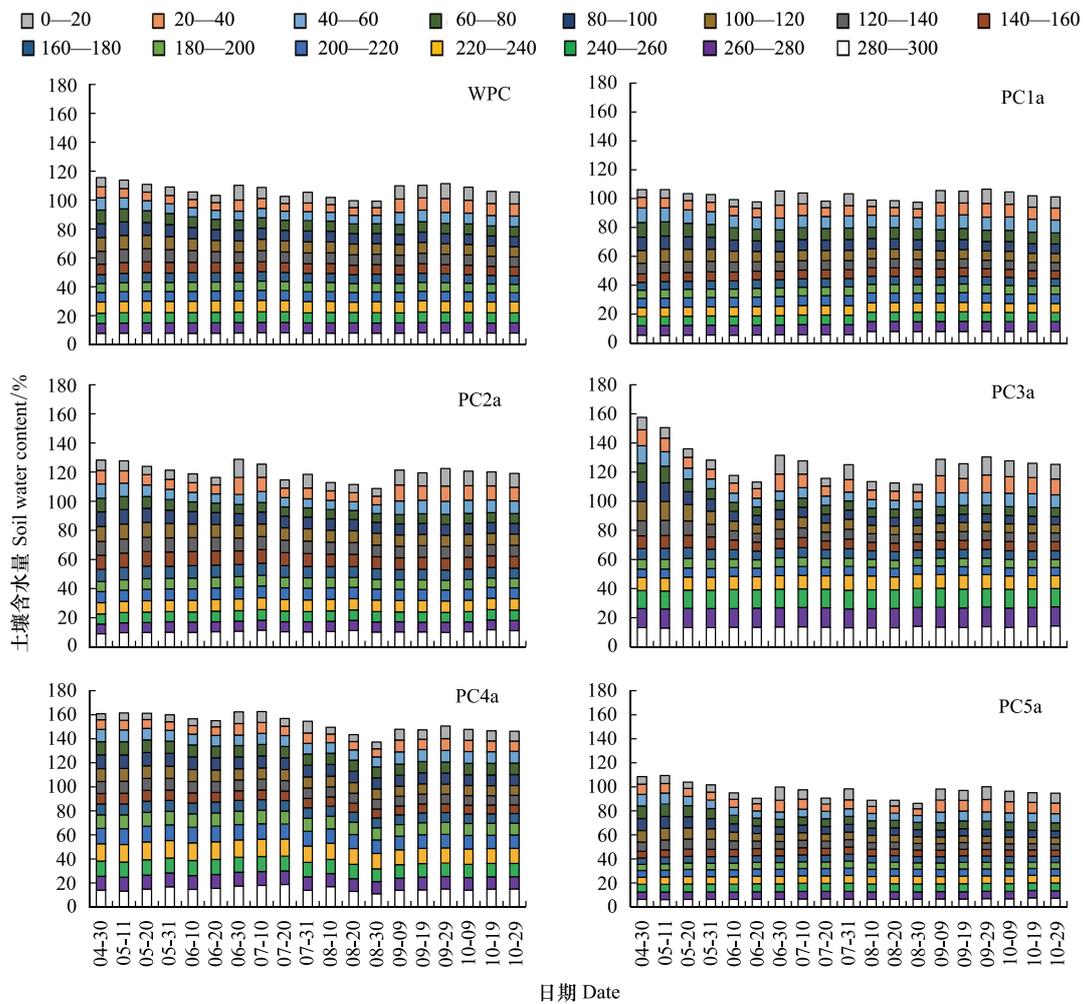


图1 不同平茬年限人工柠条林土壤水分的时间变化

Fig.1 Temporal variation of soil moisture of *Caragana intermedia* forests with different mowing years

WPC:未平茬,PC1a:平茬1年,PC2a:平茬2年,PC3a:平茬3年,PC4a:平茬4年,PC5a:平茬5年

0—20cm 和 20—40cm 分别存在 19 个偏少中心,19 个偏多中心,且振动强度不同,说明表层 PC3a 与 PC4a 柠条表层土壤水分变化叫剧烈,受柠条的光合特性及生长特征影响较为明显;40—80cm 土层深度的水分周期变化逐渐增大,80—100cm 开始出现 9 个偏多中心和 9 个偏少中心,且一直保持至 140—160cm 土层深度,160—180cm 土层深度偏多中心与偏少中心振动强度开始减弱,随着土壤深度的增加开始接近于深层的土壤变化周期。总体而言,在 0—180cm 土层深度之间差异显著,说明平茬措施对不同平茬年限柠条在 0—180cm 土壤水分的改善作用明显

### 2.3 环境因子日变化及不同平茬年限柠条叶片生理特征

#### 2.3.1 环境因子日变化

在测量时段内大气  $\text{CO}_2$  浓度、气温日变化、光合有效辐射变化趋势明显(见图 3)。气温在 9:00 最低为  $25.50^\circ\text{C}$ ,15:00 达到最高  $31.10^\circ\text{C}$ ,10:00—16:00 气温变化较为平缓,18:00 温度降到  $30.70^\circ\text{C}$ ;大气  $\text{CO}_2$  浓度在测量时段内整体变幅不大,9:00 最值高  $383.32\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,其后开始逐渐降低,12:00 时降到了最低  $380.40\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,10:00—16:00 大气  $\text{CO}_2$  浓度开始较为平稳,呈先下降后上升的趋势,18:00 再次达到峰值  $383.10\mu\text{mol}/\text{mol}$ ;光合有效辐射在 18:00 为测量时段最低  $1206.10\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,12:00 为测量时段最高  $2315.74\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,10:00—16:00 光合有效辐射变化趋势明显,呈先上升后下降的趋势。

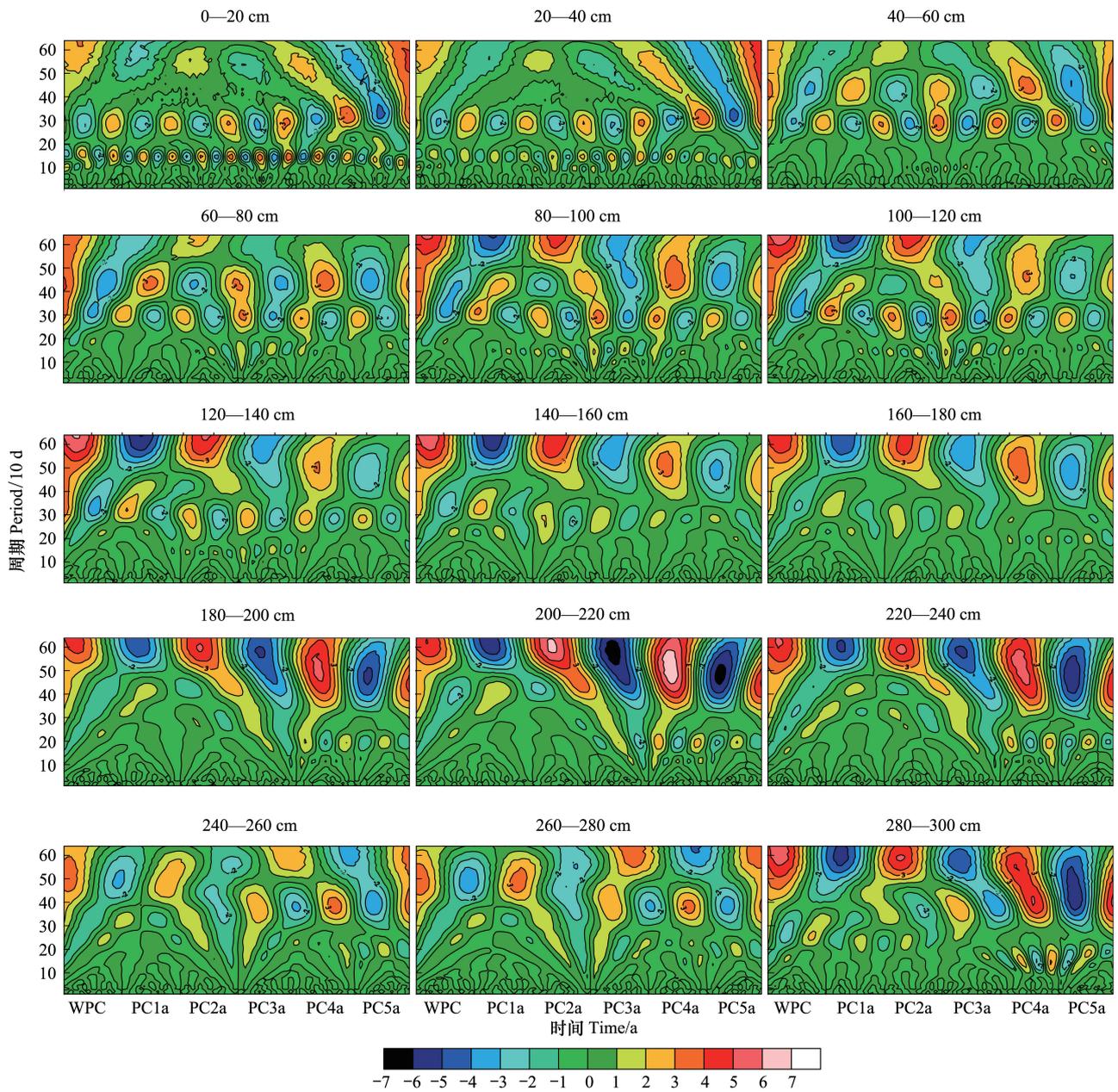


图2 平茬柠条不同剖面深度土壤水分小波变换系数实部等值线图

Fig.2 Wavelet transform coefficient real part contour map of soil moisture at different depths in *Caragana intermedia* with different mowing years

### 2.3.2 不同平茬年限柠条光合作用特征比较

不同平茬年限柠条净光合速率、蒸腾速率及水分利用效率(见图4(A)(B)(E))变化趋势一致。对照组WPC柠条的净光合速率和蒸腾速率平均值显著低于其他平茬年限,WPC-PC1a柠条的净光合速率和蒸腾速率显著提高( $P < 0.05$ ),PC1a—PC2a柠条的净光合速率和蒸腾速率缓慢下降( $P > 0.05$ ),PC3a继续显著上升( $P < 0.05$ ),且在PC4a时达到了最大值,净光合速率高于WPC柠条66.75%,PC4a柠条的蒸腾速率高于WPC柠条53.79%,到PC5a时柠条的净光合速率和蒸腾速率开始下降,但仍高于WPC,说明PC3a—PC4a柠条的生长最为活跃,PC5a则开始接近WPC,生长速率渐缓。由于不同平茬年限柠条的水分利用效率由净光合速率和蒸腾速率计算得到,所以表现出相同的变化趋势,WPC柠条的水分利用效率显著低于其他平茬年限( $P < 0.05$ ),而PC1a—PC5a柠条的水分利用效率变化不显著( $P > 0.05$ ),说明平茬措施改变了柠条水分利用效率,

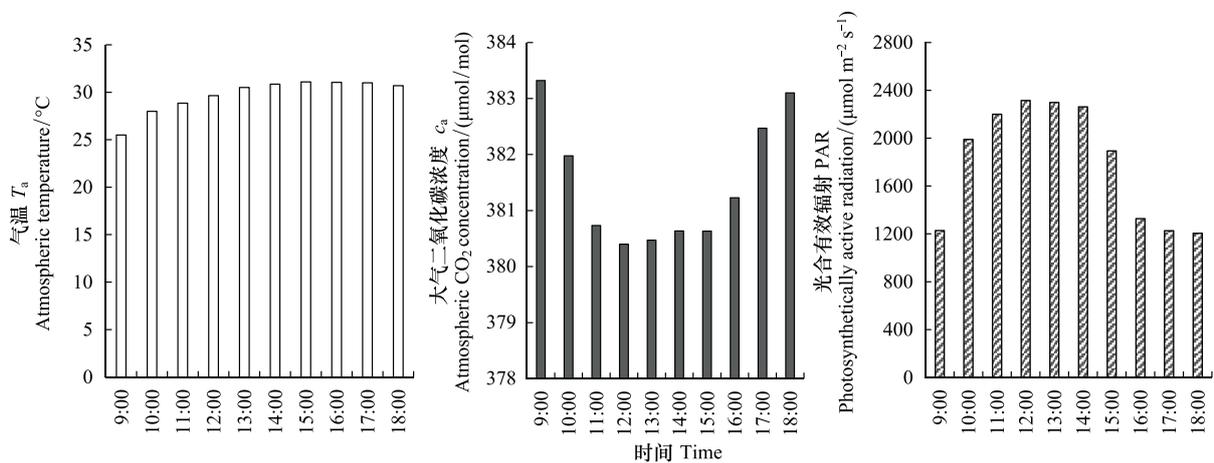


图3 环境因子日变化

Fig.3 Diurnal variation of environmental factors

平茬后进入补偿生长的活跃期,生长旺盛,水分利用效率显著提高,PC1a 高于 WPC 柠条的水分利用效率 37.96%,但随着平茬年份的增加,其对不同平茬年限柠条的水分利用效率的影响较小。

不同平茬年限柠条的气孔导度呈先上升后下降的趋势(见图 4 (C)),与 WPC 柠条相对 PC1a—PC4a 呈显著升高的趋势( $P<0.05$ ),PC4a 气孔导度达到最高,高于 WPC 柠条 61.00%,PC5a 气孔导度较 PC4a 显著下降( $P<0.05$ ),但仍显著高于 WPC 柠条( $P<0.05$ ),且 WPC 柠条与不同平茬年限的柠条差异性显著( $P<0.05$ )。此外,在 10:00—16:00 测量时段内不同平茬年限柠条及 WPC 柠条的气孔导度呈现先下降后上升再下降的变化趋势,可见平茬措施及平茬年限的改变不是影响气孔导的日变化规律的因素。但随着平茬年限的提高,每一个测量时段气孔导度相应增大,因此影响了 PC1a—PC5a 柠条的气孔导度。

不同平茬年限柠条的胞间  $\text{CO}_2$  浓度呈现“W”型变化趋势(见图 4 (D))。WPC—PC1a 胞间  $\text{CO}_2$  浓度显著下降( $P<0.05$ ),说明对 PC1a 柠条的胞间  $\text{CO}_2$  浓度影响较大,PC1a—PC2a 显著上升( $P<0.05$ ),PC2a—PC3a 缓慢下降( $P>0.05$ )、PC3a—PC5a 又产生小幅上升( $P>0.05$ ),平均胞间  $\text{CO}_2$  浓度大小为 WPC>PC2>PC4>PC5>PC3>PC1。不同平茬年限柠条及 WPC 柠条的胞间  $\text{CO}_2$  浓度日变化基本保持一致,基本呈先下降后上升的趋势,在测量时段初始 10:00 都保持着较高的胞间  $\text{CO}_2$  浓度,且全天胞间  $\text{CO}_2$  浓度都保持较低水平,16:00 光合作用强度降低,胞间  $\text{CO}_2$  浓度才开始缓步提高。而 PC1a 与 PC4a 柠条的胞间  $\text{CO}_2$  浓度日变化则出现了不同的变化趋势,其原因可能是因为柠条的补偿生长及较高的气孔导度导致其出现不同的变化趋势。

### 3 讨论

土壤水分和光照作为限制植物光合作用的主要因子<sup>[17]</sup>,在干旱、半干旱地区,日照丰富,土壤水分成为限制植物生长的主要因素,而水分亏缺则会导致植物生长减缓、气孔关闭、蒸腾速率下降、光合速率下降<sup>[18]</sup>,平茬、刈割后的植物冠幅、株高、总叶面积等形态特征发生改变,导致植物的根冠比失衡,进一步影响了柠条的立地土壤条件,同时影响了土壤含水量及其周期性变化。对柠条进行平茬后,早期土壤水分并未迅速恢复,基本保持原有水平,各层变周期性变化强度也基本一致,随着柠条平茬后恢复年限的延续,土壤水分开始逐年升高,周期性变化强度由逐渐升高开始减弱,PC3a 和 PC4a 的周期性变化强度最剧烈。与此同时,柠条的补偿生长逐渐活跃,平茬初期的光合作用迅速增长,到 PC3a—PC4a 柠条的补偿生长达到最旺盛阶段,此后补偿生长减弱逐渐接近对照组的 WPC 柠条。虽然平茬早期的土壤水分并未迅速提高,但植物的物质分配由地下转为地上<sup>[19-20]</sup>,此阶段柠条的光合作用受自身性状的影响大于对土壤水分的影响;平茬中期的土壤水分在空间和时间的尺度上都得到了明显改善,而自身性状变化不显著,此时的土壤水分对光合作用的影响大于柠条的补偿生长作用;平茬后期,平茬柠条出现老化柠条的一些性状,植物长期为地上部分的生长提供有效水分,加

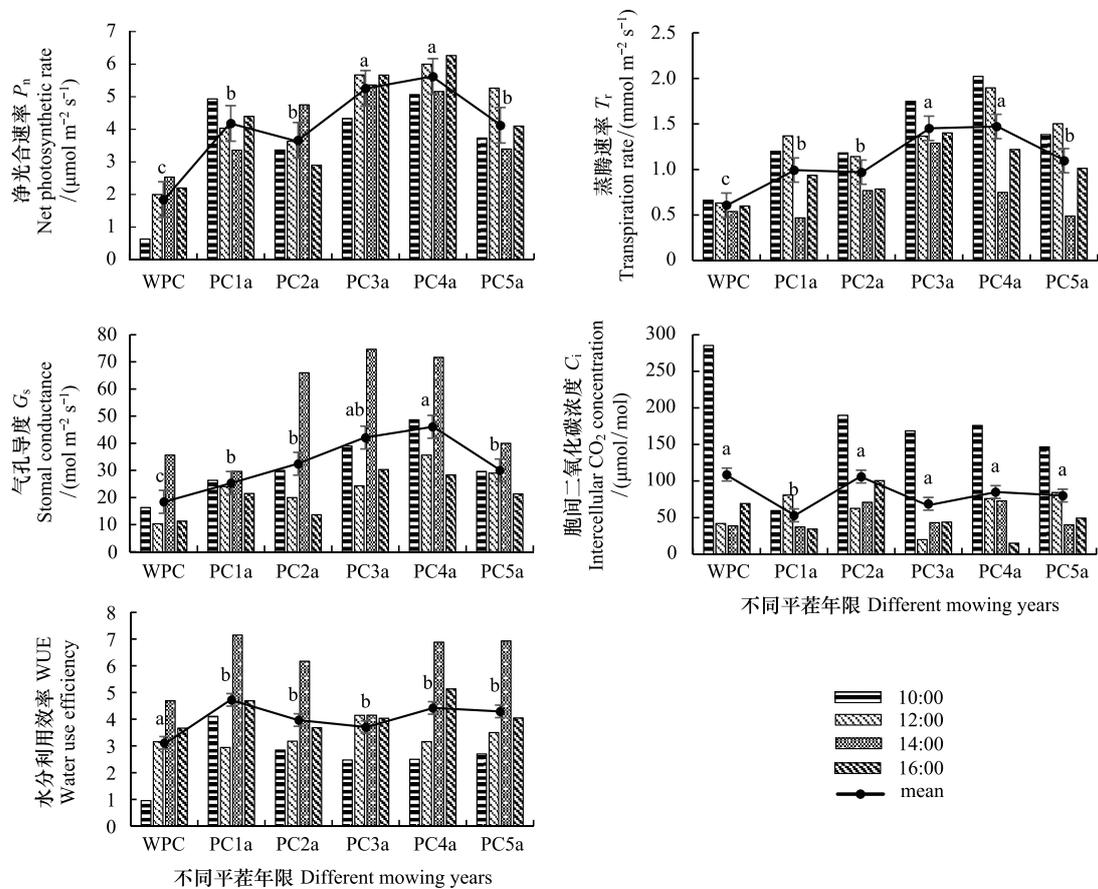


图4 不同平茬年限柠条光合作用比较

Fig.4 Photosynthesis comparison of *Caragana intermedia* with different recover years after been mowed

A:净光合速率,B:蒸腾速率,C:气孔导度,D:胞间  $\text{CO}_2$  浓度,E:水分利用效率

之柠条生长所需的物质再次转为地下,土壤水分开始出现消退。

测量时段选在7月柠条的生长旺盛期,但是此期间研究区高温少雨,蒸发量高,环境因子的影响一定程度制约着柠条的光合作用,在  $PAR > 1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  强光照射下,柠条的净光合速率和蒸腾速率都产生了显著的提高,但是 PC2a 柠条各项光合作用指标略有下降,造成这种情况的原因可能是由于受到较高的光合有效辐射的影响,高温导致柠条受到水分胁迫,处于恢复期的柠条在土壤水分和强光胁迫共同作用下,发生了光抑制作用<sup>[21-22]</sup>,PC2a 柠条通过光抑制防御机制来适应恶劣的生存环境,并通过调节胞间  $\text{CO}_2$  浓度来控制光合作用,降低水分利用效率,为 PC3a 较高的土壤含水量及剧烈的土壤水分变化周期提供基础。

土壤水分的变化随着深度的改变表现出不同的周期变化趋势,由于平茬后,土壤水分入渗深度明显减弱<sup>[23]</sup>,导致不同平茬年限柠条表层土壤水分的变化周期较短,但活动剧烈程度较弱;而深层土壤的周期变化保持稳定,每个周期变化强度基本相同,且在 240—280cm 处存在干层现象。但在 60—180cm 土层深度的土壤水分随着柠条平茬年限的提高,柠条对土壤水分利用能力也不断增强,水分变化周期不断扩大,但变化强度开始逐渐减弱,说明 60—180cm 为柠条根系组织的主要分布区和生长活跃区,这与荀俊杰等<sup>[24]</sup>的研究结论略有不同。由于土壤水分的分布决定着植物根系的生长状态<sup>[25-26]</sup>,进一步影响柠条补偿生长,而柠条的补偿生长还受土壤中其他元素的限制及水分生理变化的影响<sup>[27-28]</sup>,因此针对不同地区不同立地条件对平茬后柠条的恢复周期的还需进一步研究,从而对荒漠草原地区老化柠条林的合理准确的平茬及应用方法提供科学指导。

## 4 结论

(1) 生长季年内变化, PC1a—PC5a 柠条在对土壤水分的保持能力均高于 WPC 柠条; 对比不同平茬年限柠条土壤水分, PC3a 增长迅速, PC4a 水分条件最优, PC5a 土壤水分消退逐渐向 WPC 柠条的土壤水分接近; 土壤垂直剖面上, PC1a—PC4a 柠条根系活跃区的土壤水分随着平茬年份的增加, 深层的土壤水分得到有效改善, 到 PC5a 时开始回落。

(2) 不同平茬年限土壤含水量变化剧烈程度分别为 PC4a>PC5a>WPC>PC2a>PC3a>PC1a, 且平茬措施对非根系活跃区的深层土壤水分影响不大, 平茬后, 对 0—180cm 土层深度的影响显著, 且以平茬 PC4a 和 PC5a 的土壤水分周期性变化最长, 振动强度变化最明显。

(3) 平茬早期(PC1a—PC2a)的土壤水分并未迅速提高, 此阶段柠条的光合作用受自身性状的影响大于对土壤水分的影响; 平茬中期(PC3a—PC4a)的土壤水分对光合作用的影响大于柠条的补偿生长作用; 平茬后期(PC5a), 平茬柠条光合作用减弱及性状几乎不发生变化, 土壤水分状况也开始接近 WPC 柠条。因此, 在此研究区内, 可将 PC5a 柠条资源作为科学有效利用的最佳时段。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 周静静, 马红彬, 周瑶, 蔡育荣, 吴兴旺, 宿婷婷, 贾希洋. 荒漠草原不同带间距人工柠条林平茬对林间生境的影响. 草业学报, 2017, 26(5): 40-50.
- [ 2 ] 李新荣. 干旱沙漠区生态工程与生态恢复研究//陈宜瑜. 生态系统定位研究. 北京: 科学出版社, 2009: 219-224.
- [ 3 ] 杨永胜, 卜崇峰, 高国雄. 平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响. 生态学报, 2012, 32(4): 1327-1336.
- [ 4 ] Suresh K, Nagamani C, Ramachandrudu K, Mathur R K. Gas-exchange characteristics, leaf water potential and chlorophyll *a* fluorescence in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings under water stress and recovery. *Photosynthetica*, 2010, 48(3): 430-436.
- [ 5 ] Ou L J, Dai X Z, Zhang Z Q, Zou X X. Responses of pepper to waterlogging stress. *Photosynthetica*, 2011, 49(3): 339-345.
- [ 6 ] 郎莹, 张光灿, 张征坤, 刘顺生, 刘德虎, 胡小兰. 不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟. 生态学报, 2011, 31(16): 4499-4508.
- [ 7 ] Lang Y, Wang M, Zhang G C, Zhao Q K. Experimental and simulated light responses of photosynthesis in leaves of three tree species under different soil water conditions. *Photosynthetica*, 2013, 51(3): 370-378.
- [ 8 ] 宋乃平, 杨明秀, 王磊, 王兴, 肖绪培, 曲文杰. 荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2618-2624.
- [ 9 ] 梁海斌. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤水分特征研究[D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [ 10 ] 鲍婧婷, 王进, 苏洁琼. 不同林龄柠条(*Caragana korshinskii*)的光合特性和水分利用特征. 中国沙漠, 2016, 36(1): 199-205.
- [ 11 ] 刘军. 放牧对松嫩草地植物多样性、生产力的作用及机制[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [ 12 ] 贺郝钰, 李新荣, 苏洁琼. 火烧对荒漠化草原土壤性质的影响. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3312-3317.
- [ 13 ] 王璠. 施肥和刘割对亚高寒草甸种间相互作用的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [ 14 ] 高天鹏, 方向文, 李金花, 李凤民, 王一峰. 水分对柠条萌蘖株和未平茬株光合参数及调渗物质的影响. 草业科学, 2009, 26(5): 103-109.
- [ 15 ] 高忠江, 施树英, 李钰. SPSS 方差分析在生物统计的应用. 现代生物医学进展, 2008, 8(11): 2116-2120.
- [ 16 ] 祁顺杰, 陈皓锐. Morlet 小波在降雨的多时间尺度分析中的应用. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 79-82.
- [ 17 ] 郎莹, 汪明. 春、夏季土壤水分对连翘光合作用的影响. 生态学报, 2015, 35(9): 3043-3051.
- [ 18 ] 方向文. 地上组织去除后柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)补偿生长的生理生态机制[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [ 19 ] Ohyama T, Harper J E. Effects of shoot removal on N<sub>2</sub> fixation and assimilation in modulation mutant and wild-type soybean. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1991, 37(3): 471-476.
- [ 20 ] Ofosu-Budu K G, Saneoka H, Fujita K. Analysis of factors controlling dinitrogen fixation and nitrogen release in soybean using pod removal, stem girdling, and defoliation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1995, 41(3): 407-416.
- [ 21 ] 张金玲, 陈海鹏, 程达, 李玉灵. 毛乌素沙地臭柏(*Sabina vulgaris* Ant.)光抑制响应机制研究意义. 干旱区研究, 2018, 35(4): 882-890.
- [ 22 ] 王强, 温晓刚, 张其德. 光合作用光抑制的研究进展. 植物学通报, 2003, 20(5): 539-548.
- [ 23 ] 刘凯. 荒漠草原人工柠条林土壤水分动态及其对降水脉动的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2013.
- [ 24 ] 荀俊杰, 李俊英, 陈建文, 史建伟, 王孟本. 幼龄柠条细根现存量与环境因子的关系. 植物生态学报, 2009, 33(4): 764-771.
- [ 25 ] 韩建秋, 王秀峰, 张志国. 土壤水分梯度对白三叶(*Trifolium repens*)光合作用和根系分布的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 493-499.
- [ 26 ] 张海娜. 柠条锦鸡儿平茬后补偿生长的生理生态机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- [ 27 ] 郑聪聪, 王永静, 孙昊, 王新宇, 高英志. 盐碱条件下刘割干扰对羊草的氮素分配策略及补偿生长的影响. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2222-2230.
- [ 28 ] 王平平. 刘割驼绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)补偿生长特征与光合、水分生理特性[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.