

冀北沙荒地黄柳光合与蒸腾速率日变化特征

蔺鑫, 刘歌畅, 杨晔, 李玉灵*, 李晓刚 (河北农业大学林学院, 河北保定 071000)

摘要 [目的]探讨不同坡位黄柳光合与蒸腾的日变化规律,明确不同坡位黄柳光合生产与蒸腾耗水的关系。[方法]以冀北沙荒地黄柳沙障为研究对象,采用 LI-6400 光合测定仪,测定不同坡位黄柳光合、蒸腾及其光合有效辐射、气温、叶面温度的日变化,并以光合、蒸腾速率计算水分利用效率日变化数据。[结果]不同坡位黄柳光合速率(P_n)日变化有差异。下坡黄柳光合日变化为双峰曲线。中坡光合为下降曲线。上坡黄柳光合日变化呈现曲折下降趋势。下坡黄柳光合速率日最大值、日均值分别为 0.340 和 0.220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;中坡黄柳光合速率日最大值、日均值分别为 0.290 和 0.210 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;上坡黄柳光合速率日最大值、日均值分别为 0.350 和 0.220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。[结论]研究结果为提高冀北沙漠化土地黄柳防风固沙功能及其黄柳资源的合理利用提供了理论依据。

关键词 冀北沙荒地;黄柳;净光合速率;蒸腾速率;日变化

中图分类号 S718.43 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)27-0006-04

Diurnal Variation Characteristics of Photosynthesis and Transpiration Rate of *Salix gordejvii* in Sandy Land of Northern Hebei LIN Xin, LIU Ge-chang, YANG Ye, LI Yu-ling* et al (College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

Abstract [Objective] The aim was to reveal the diurnal variation characteristics of photosynthesis and transpiration rate of *Salix gordejvii* in different slopes, and the relationship between photosynthesis and water consumption for transpiration. [Method] We took the sand barrier by *Salix gordejvii* in sand slope of northern Hebei as the research object, measured diurnal variation of photosynthesis, transpiration and PAR, atmospheric temperature and leaf surface temperature of *Salix gordejvii* in different slope by using Li-6400 portable photosynthesis system, the diurnal variation of water use efficiency was calculated by photosynthesis and transpiration rate. [Result] The diurnal variation photosynthetic rate were different in different slope positions. Diurnal variation of photosynthesis in downslope presented a bimodal curve, that in mesoslope presented downtrend curve, and that in upslope presented downward trend. The daily maximum of P_n in the downslope was 0.340 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and the daily average was 0.220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The daily maximum of P_n in mesoslope was 0.290 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and the daily average was 0.210 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The daily maximum of P_n in upslope was 0.350 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and the daily average was 0.220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. [Conclusion] The results provide theoretical basis for improving wind and sand control function of *Salix gordejvii* in northern Hebei sandy land and the reasonable use of *Salix gordejvii* resources.

Key words Northern Hebei sandy land; *Salix gordejvii*; Net photosynthetic rate; Transpiration rate; Diurnal change

冀北承德地区是围绕京津的主要生态屏障之一,属国家京津风沙源治理工程建设区。在该区域的沙漠化土地上开展植被恢复与重建,是防治沙漠化最主要和最基本的措施,然而由于该区域沙漠化土地均为沙荒地,而不同坡位植物生存的微环境是不一样的,一般而言,坡顶条件更为严酷,因此分析不同坡位植物生理生态特性,对了解沙荒地不同部位植物防风固沙功能及其植被配置有实践指导意义。

黄柳(*Salix gordejvii*)是杨柳科柳属的一种旱中生多年生灌木,作为干旱半干旱地区山地和沙地上自然分布的一种灌木树种,以其适应范围广,抗旱、耐沙埋、萌蘖能力旺盛等防风固沙能力强特性,成为北方干旱、半干旱区防风固沙水土保持的优良树种^[1],关于黄柳的生物学、生态学特性^[2-4]已有较多研究^[5],它的一些重要生理活动参数如叶气孔导度和水分状况的时空变化已有报道^[6]。但是冀北沙荒地黄柳的光合生产能力与蒸腾耗水关系的研究鲜见报道。作为防风固沙灌木树种而言,地上部分的生物量直接影响其防风固沙功能,而光合作用是决定植物生物量也就是生产力的关键因素,而植物在进行光合作用的同时不得不开张气孔,通过蒸腾散失水分,所以作为干旱半干旱地区的植物而言,以较低的水分消耗获取最大的光合产物是其立足之本。为此,笔

者以木兰围场沙化土地人工栽植的黄柳为研究对象,研究了沙荒地不同坡位黄柳光合速率、蒸腾速率日变化特征,并求算水分利用效率,以期为提高冀北沙漠化土地黄柳防风固沙功能及其黄柳资源的合理利用提供理论依据。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况 研究区位于河北省最北端的围场满族蒙古族自治县境内^[7],地理坐标为 116°51' ~ 117°45' E, 41°47' ~ 42°06' N,面积为 50 637.4 hm^2 。该区域地处内蒙古高原南缘与冀北山地的过渡地带,由坝上高原和冀北山地等地貌单元构成,平均海拔 1 374 m,最高海拔 1 998 m,相对高差最大为 1 200 m。该地具有典型的山区气候特征,年均气温 3.0 ~ 4.0 $^{\circ}\text{C}$,7月气温最高,平均为 18.5 $^{\circ}\text{C}$,极端高温 35.0 $^{\circ}\text{C}$;1月气温最低,平均为 -17.5 $^{\circ}\text{C}$,极端低温为 -39.0 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 380 ~ 560 mm,但降水的季节分布很不均匀,无霜期西北部为 90 ~ 100 d,中部和东南部为 100 ~ 125 d。年日照时间长,平均为 2 000 ~ 3 000 h。依据气候带划分,该地区属于寒温带大陆性气候类型,受地形、地貌、植被、地理位置等影响,春季气温回升较为迅速,夏季雨量集中,秋霜出现较早,冬季寒冷并盛行西北风。研究区成土母质以花岗岩和石英岩为主,土壤类型较为多样,以棕黄色森林砂壤土为主,其次为棕色森林壤土,土壤质地多为壤质和粉砂壤质,土层比较深厚。研究地区地上植被覆盖程度差,乔灌木稀少,常见一年生和多年生草本及半灌木物种,如地肤(*Kochia scoparia*)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd. Sp. Pl.)、狗尾草(*Setaria viridis*)、野麻(*Boehmeria gracilis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolors*)等。

基金项目 国家林业行业公益专项“环京津生态脆弱区生态经济植被建设技术研究”(1214019)。

作者简介 蔺鑫(1993—),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向:退化生态系统恢复。*通讯作者,教授,博士,从事恢复生态学

收稿日期 2017-06-28

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置。河北省木兰林业管理局现已拥有封育条件下的黄柳沙障灌木林 300 hm², 为该研究提供了充足的试验材料。调查地位于承德围场县南山嘴封育区沙梁地上, 梁地平均坡度 11°, 坡长 182.55 m。2003 年采用扦插法沿沙梁等高线设置黄柳防风固沙林。根据实际坡形把梁地分为上坡、中坡、下坡 3 个部分。在每个坡位分别设置 33 m × 20 m 的样地, 各样地海拔分别为 1 066、1 048、1 030 m, 各样地所在坡面坡向一致。

1.2.2 测量方法。黄柳叶片光合速率的测定使用 LCI 便携式光合仪, 分别在上、中、下坡的样地内选择 3 株生长旺盛且具有代表性的黄柳, 每株标记 3 个生长良好的枝条, 选取其上部完全展开的叶片, 分别挂上统一编号的标牌以便观测自然光条件下光合速率及环境因子的日变化。于 08:00—18:00 每隔 2 h 测定 1 次光合速率 (P_n)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i)、辐射 (Q)、蒸腾速率 (T_r) 等指标, 连续测 3 d, 测定日期为 8 月 26、28 和 29 日。气温、叶温、大气压力等环境因子由 LCI 便携式光合仪在测定光合作用的同时获得。每个测定日均为晴朗天气。

1.3 数据处理 利用 SPSS 软件进行数据相关性分析和其他统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同坡位黄柳光合速率日变化 植物光合作用日变化是植物生长过程中物质积累与生理代谢的基本单元, 也是分析环境因素影响植物生长和代谢的重要手段^[8]。一般条件下栽培植物的光合作用日变化均有规律可循, 其变化曲线呈双峰型或单峰型^[9-15]。由图 1 可知, 下坡位黄柳 08:00—12:00 光合速率较高, 12:00 达到全天的最高值 [0.350 μmol/(m² · s)], 14:00 出现“午休”现象, 16:00 又有小幅回升, 18:00 出现最低值 [0.066 μmol/(m² · s)]。全天日均值为 0.220 μmol/(m² · s)。总体趋势是 12:00 之前各个时段的光合速率普遍高于 12:00 之后的各个时段; 中坡位黄柳光合速率日变化为下降曲线, 08:00 出现一天当中的最高值 [0.290 μmol/(m² · s)], 之后逐渐降低, 18:00 出现最低值 [0.080 μmol/(m² · s)], 日均值为 0.210 μmol/(m² · s)。上坡位光合速率日变化趋势与下坡位相近, 同样是 08:00—12:00 光合速率较高, 12:00 达到全天的最高值 [0.350 μmol/(m² · s)], 14:00 出现“午休”现象, 16:00 又有小幅回升, 18:00 达到最低值 [0.066 μmol/(m² · s)]。但波动幅度较大, 上坡位 08:00 的光合速率明显高于中、下坡位, 而 12:00 的光合速率又与中、下坡位相近, 12:00 以后光合速率急速下降, 虽然上坡位光合速率值变化剧烈, 但日均值和中坡位相同, 也是 0.210 μmol/(m² · s)。

2.2 黄柳蒸腾速率日变化 由图 2 可知, 上、中、下坡位蒸腾速率日变化总体趋势均为下降曲线, 08:00 的蒸腾速率是一天当中蒸腾速率的最大值, 分别为 1.00、0.08、0.09 mmol/(m² · s), 中、下坡位 14:00 出现最低值, 分别为 0.02、0.03 mmol/(m² · s), 16:00 蒸腾速率又有小幅回升,

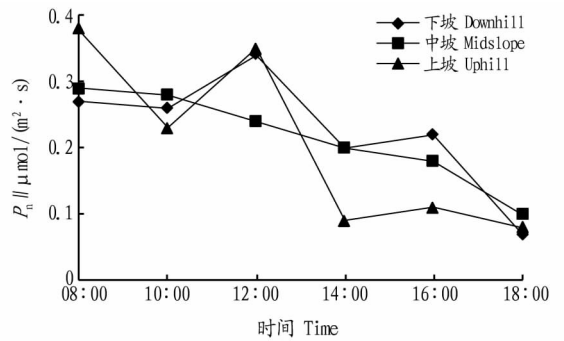


图 1 不同坡位黄柳光合速率日变化

Fig. 1 Diurnal variation of different slope positions on photosynthetic rate of *Salix gordejewii*

18:00 又有下降。可见, 中、下坡位蒸腾速率日变化有“午休”现象^[16], 与光合速率日变化“午休”时相一致。而上坡位的蒸腾速率无明显的“午休”现象, 从 08:00 的最大值开始一直下降到 18:00 的最低值, 没有像光合速率一样出现“午休”现象。上、中、下坡位蒸腾速率日均值分别为 0.04、0.05、0.05 mmol/(m² · s), 上坡位蒸腾速率最小, 中、下坡位相近。

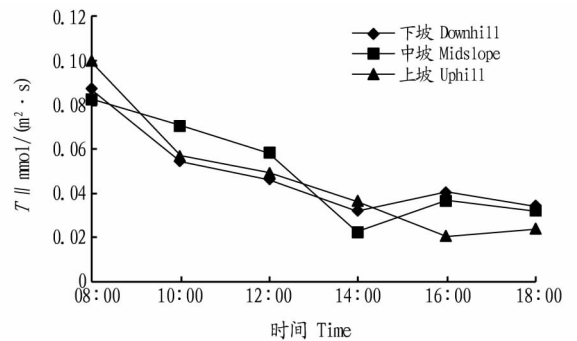


图 2 不同坡位黄柳蒸腾速率 (T_r) 日变化

Fig. 2 Diurnal variation of transpiration rate of *Salix gordejewii*

2.3 不同坡位水分利用效率 (WUE) 的日变化 由图 3 可知, 上、下坡位的水分利用效率日变化趋势相近, 均为双峰曲线。第 1 个峰值出现在 12:00, 第 2 个峰值出现在 14:00, 与光合速率日变化趋势一致, 虽然上、下坡位光合速率在 08:00 较高, 但由于同时蒸腾速率也很高, 导致水分利用效率降低。中坡位水分利用效率与上、下坡位不同, 为单峰曲线, 最高值出现在 14:00, 此刻也出现中坡位蒸腾速率的最低值, 这可能是造成其水分利用效率达到最大的原因。上、中、下坡位水分利用效率日均值分别为 5.43、4.95、5.00 g/kg。上坡位水分利用效率最大, 中坡位最小。

2.4 不同坡位黄柳光合有效辐射 (PAR) 和气温因子日变化 由图 4~6 可知, 不同坡位的光合有效辐射和气温、叶面温度日变化均为单峰曲线^[17], 其中 3 个坡位的 PAR 从 08:00 开始迅速上升, 上坡最大值出现在 10:00, 为 1 626.00 μmol/(m² · s), 中、下坡位在 14:00 出现全天最大值, 分别为 1 617.89、1 301.67 μmol/(m² · s), 然后逐渐降低, 3 个坡位均在 18:00 降至最低值, 中、下坡位变化趋势更为接近。3 个坡位之间的气温和叶温日变化趋势完全相同, 均从 08:00 开始迅速上升, 下坡与中坡位在 12:00、上坡位在

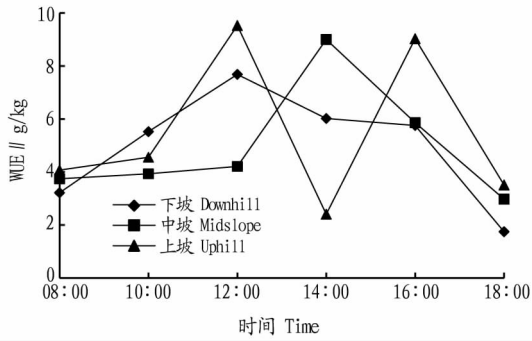


图3 不同坡位黄柳水分利用效率(WUE)日变化

Fig. 3 Diurnal variation of water use efficiency(WUE) of different slope positions of *Salix gordejvii*

14:00 出现全天最大值, 然后开始逐渐降低, 18:00 降至最低值。中、下坡位气温和叶温极值时相(12:00)超前于光合有效辐射极值时相 2 h(14:00), 而上坡位气温和叶温极值时相(14:00)落后于光合有效辐射极值时相(10:00) 4 h, 光合有效辐射极值时相较中、下坡位提早出现 2 h, 而气温、叶温极值时相推后出现 2 h。

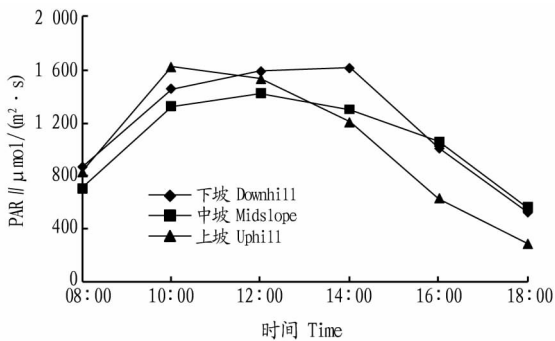


图4 不同坡位黄柳光合有效辐射(PAR)日变化

Fig. 4 Diurnal variation of PAR in different slope positions of *Salix gordejvii*

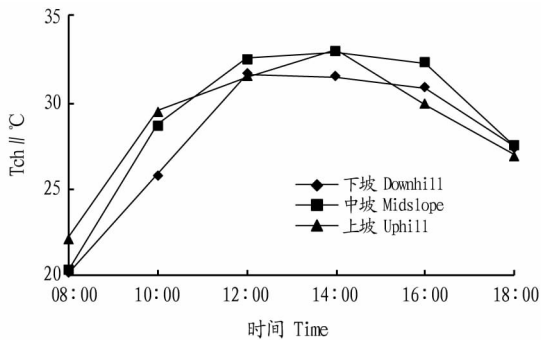


图5 不同坡位大气温度(T_{ch})日变化

Fig. 5 Diurnal variation of atmospheric temperature (T_{ch}) in different slope positions of *Salix gordejvii*

2.5 光合速率、蒸腾速率与环境因子相关性分析(表1) 3个坡位黄柳的净光合速率(P_n)均与 PAR 呈显著正相关关系, 说明不同坡位黄柳光合日变化均随 PAR 的增强而增大, 但 PAR 对不同坡位蒸腾的影响不同, PAR 与下坡位蒸腾呈负相关关系, 与中、上坡位黄柳蒸腾呈正相关。随大气温度和叶面温度的变化, 下坡位 P_n 表现出特殊变化规律, 只有下

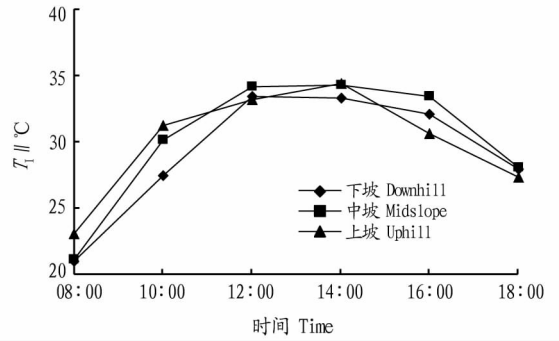


图6 不同坡位黄柳叶面温度(T_l)日变化

Fig. 6 Diurnal variation of leaf surface temperature of *Salix gordejvii* in different slope positions

坡位的 P_n 与大气温度和叶面温度呈正相关关系, 中、上坡位均呈负相关关系。以上结果表明, 下坡位黄柳光合速率与光合有效辐射、气温和叶温均呈正相关关系, 其光合速率最高值与 PAR 最高值出现时间一致, 而中、上坡位随温度升高, 光合速率、蒸腾速率下降, 可见下坡位黄柳光合能力最旺盛^[18-20]。

表1 光合速率、蒸腾速率与环境因子相关性分析

Table 1 Correlation analysis of photosynthetic rate, transpiration rate and environmental factors

因素 Factors	坡位 Slope position	蒸腾速率 (T_r) Transpiration rate	光合速率 (P_n) Photosynthetic rate
辐射 PAR	下坡	-0.020	0.483*
	中坡	0.037	0.390
	上坡	0.234	0.386
大气温度 T_{ch}	下坡	-0.467	0.059
	中坡	-0.257	-0.242
	上坡	-0.102	-0.441
叶面温度 T_l	下坡	-0.469	0.103
	中坡	-0.258	-0.212
	上坡	-0.087	-0.397

注: * 表示 P 在 0.05 水平下显著相关(两端检验)

Note: * indicated that correlation was significant at the 0.05 level (2-tailed)

3 结论

下坡位黄柳净光合速率日变化呈双峰型曲线, 有较为明显的“午休”现象; 中坡位黄柳净光合速率日变化趋势呈下降曲线, 并未出现“午休”现象; 上坡位黄柳净光合速率日变化也有“午休”迹象。上、中、下坡位黄柳光合速率日均值分别为 0.210、0.210、0.220 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 下坡位最大, 中、上坡位相近。

中、下坡位蒸腾速率日变化有“午休”现象, 与光合速率日变化“午休”时相一致, 而上坡位的蒸腾速率没有明显的“午休”现象。上、中、下坡位蒸腾速率日均值分别为 0.04、0.05、0.05 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 上坡位最小, 中、下坡位相近。

上、下坡位的水分利用效率日变化趋势相近, 均为双峰曲线, 中坡位为单峰曲线。上、中、下坡位水分利用效率日均值分别为 5.43、4.95、5.00 g/kg, 上坡位水分利用效率最大, 中坡位最小。

3 个坡位黄柳的净光合速率均与 PAR 呈显著正相关关系,中、上坡位光合速率、蒸腾速率与叶温、气温呈负相关关系。下坡位黄柳光合速率与气温和叶温呈正相关关系,其光合速率最高值与 PAR 最高值出现时间一致。

以上结论说明上坡位以其较小的蒸腾获得最大的水分利用效率,而下坡位恰好相反,是与其较强的光合速率获得较大的水分利用效率,说明上坡位黄柳受到干旱胁迫,抑制了光合和蒸腾作用。但由于植物光合、蒸腾作用受植物体内外诸多因子的影响,坡位即可导致光照、温湿度等环境因子出现空间分布的异质性,因而对植物光合、蒸腾的影响也是一个复杂的过程,对此还需深入研究。但就该研究结果而言,不同坡位黄柳光合、蒸腾作用不尽相同,但总体差异不是很明显,因此,在该地区建立黄柳活沙障还是行之有效的防风固沙技术之一,可以大力推广。

参考文献

- [1] 宋西德,张永,周锋利,等. 臭柏的特性研究进展[J]. 西北林学院学报, 2003,18(4):63-66.
- [2] 王康富. 辽宁省章古台主要固沙植物的习性[M]//林业集刊(3). 北京:科学出版社,1959:182-197.
- [3] 刘中民. 几种沙生植物的特性及其栽培的研究[M]//治沙研究(5). 北京:科学出版社,1963.
- [4] 常学礼,李胜功,赵学勇. 黄柳灌丛地上生物量特征及生长的研究[M]//科尔沁沙地生态环境综合整治研究. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993:201-208.
- [5] 常学礼,赵学勇,李胜功,等. 水分胁迫对冷蒿和差不嘎蒿体内水分状

况的影响[J]. 中国沙漠,1996,16(1):27-31.

- [6] 周海燕,赵爱芬. 科尔沁沙地黄柳气孔导度和水分状况随季节和地形的变化特征[J]. 植物学报,2000,17(6):543-547.
- [7] 张淑兰,张海军,徐成立,等. 河北木兰围场自然保护区现状及发展对策研究[J]. 河北林果研究,2006,21(4):460-464.
- [8] 冯建灿,张玉洁. 喜树光合速率日变化及其影响因子的研究[J]. 林业科学,2002,38(4):34-39.
- [9] 满为群,杜维广,张桂茹,等. 高光效大豆品种光合作用的日变化[J]. 中国农业科学,2002,35(7):860-862.
- [10] 廖建雄,王根轩. 谷子叶片光合速率日变化及水分利用效率[J]. 植物生理学报,1999,25(4):362-368.
- [11] 蒋德安,陆庆,翁晓燕,等. 水稻光合关键酶类在光合日变化中的作用[J]. 作物学报,2001,27(3):301-307.
- [12] 徐克章,张美善. 恒定环境条件下西洋参叶片光合作用的日变化[J]. 吉林农业大学学报,2003,25(2):134-138.
- [13] 董贯和. 不同供钾水平对小麦旗叶光合速率日变化的影响[J]. 植物生态学报,2004,28(4):547-553.
- [14] YANG J D, LIU Z M. Study on field-grown maize introduced into Tibetan plateau: Some characteristics of diurnal variation of photosynthesis[J]. Acta agronomica sinica, 2002, 28(4):475-479.
- [15] 李萍萍,胡永光,赵玉国,等. 叶用莴苣温室栽培单株光合作用日变化规律[J]. 园艺学报,2001,28(3):240-245.
- [16] 王岩春,干友民,陈立坤,等. 高寒地区川草 1 号老芒麦夏季光合生理生态特性的初步研究[J]. 草业科学,2007,24(11):42-46.
- [17] 杜菁韵,杜占池,崔晓勇. 内蒙古典型草原地区常见植物光合、蒸腾速率和水分利用效率的比较研究[J]. 草业科学,2003,20(6):11-15.
- [18] 张希明,斯蒂堪 W,龙格 M. 自然条件下幼龄欧洲山毛榉的光合速率与气候因子的关系[J]. 植物学报,1993,35(8):611-618.
- [19] 朱万泽,王金锡,薛建辉,等. 四川桉木光合生理特性研究[J]. 西南林学院学报,2001,21(4):196-204.
- [20] 李春鸣,蒲小朋,马姝雯,等. 高寒地区地膜覆盖栽培饲用甜菜光合日变化初探[J]. 西北民族大学学报(自然科学版),2005,26(1):46-48.

(上接第 5 页)

外一条途径是由于各种形式的落后染色体、未及中板集合染色体以及染色体分组造成的。染色体畸变的产生可能有以下 3 条途径:一是由于药物直接作用于 DNA 分子,造成 DNA 断裂损伤,从而引起染色体畸变;二是由于药物干扰了 DNA、蛋白质合成或者 RNA 转录,结果使与染色体运动有关的物质不能形成,由此形成染色体畸变;三是药物通过干扰某些损伤的正常修复过程,阻止染色体在正常情况下的重建从而形成新的重接,出现染色体桥、环、断片之类的重排。

4 结论

Pb²⁺ 对蚕豆根尖细胞微核率和染色体畸变率有影响,其影响程度与 Pb²⁺ 处理浓度以及处理时间有关,随着处理浓度的增大和处理时间的增长,微核率和染色体畸变率都有非常显著的提高。

参考文献

- [1] YANG S H, QU Z X, WANG H X. The migration and accumulation of lead in rice and its influence on the growth[J]. Acta Ecol Sin, 1986, 6(4):312-322.
- [2] REN A Z, GAO Y B, LUI S. Effects of Cr, Cd and Pb on free proline content etc in leaves of *Brassica chinensis* L. [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2000, 6(2):112-116.
- [3] QIN T C, WU Y S, WANG H X. Effects of cadmium, lead and their interactions on the physiological and biochemical characteristics of *Brassica chinensis*[J]. Acta Ecol Sin, 1994, 14(1):46-50.

- [4] PENG M, WANG H X, WU Y S. Ultrastructural changes induced by cadmium and lead in corn seeding cell[J]. China Environ Sci, 1991, 11(6):426-431.
- [5] YANG D H. The effects of heavy metal on the structure and function of photosynthetic membranes in higher plants[J]. Chin Bull Bot, 1991, 8(3):26-29.
- [6] ZHOU H, QU Z X, WANG H X. The migration and accumulation of lead in several crops and its influence on their growth[J]. Acta Sci Circum, 1983, 3(3):222-233.
- [7] VAN ASSCHE F, CLIJSTERS H. Effects of metal on enzyme activity in plants[J]. Plant Cell Environ, 1990, 13:195-206.
- [8] 任安芝,高玉葆,刘爽. 青菜幼苗体内几种保护酶的活性对 Pb、Cd、Cr 胁迫的反应研究[J]. 应用生态学报,2002,13(4):510-512.
- [9] ZHANG Y X. Toxicity of heavy metals to *Hordeum vulgare*[J]. Acta Sci Circum, 1997, 17(2):199-211.
- [10] KOEPE D E. Lead: Understanding the minimal toxic of lead in plants [M]//LEPP N W. Effect of heavy metal pollution on plants. New Jersey: Applied Science, 1981:55-57.
- [11] CHAKRAVARTY B, SRIVASTAVA S. Toxicity of some heavy metals in vivo and in vitro in *Helianthus annuus*[J]. Mutation Res, 1992, 283(3):287-294.
- [12] 文充溢. 钙与钙调素[M]. 北京:化学工业出版社,1989:63-164.
- [13] DEGRAEVE N. Carcinogenic, teratogenic and mutagenic effects of cadmium[J]. Mutation Res, 1981, 86(2):115-135.
- [14] KAZANTZIS G. Mutagenic and carcinogenic effects of cadmium[J]. Toxicol Environ Chem, 1984, 8(2):267-278.
- [15] HARTWELL L H, WEINERT T A. Checkpoints: Controls that ensure the order of cell cycle events[J]. Science, 1989, 246:629-633.
- [16] PAULOVICH A G, HARTWELL L H. A checkpoint regulates the rate of progression through S phase in *S. cerevisiae* in response to DNA damage [J]. Cell, 1995, 82(5):841-847.