

温室条件下增强 UV-B 辐射对小麦、谷子大小等级性和异速生长的影响

田向军¹, 林 玥¹, 邱宗波^{1,2}, 刘 晓¹, 岳 明^{1,*}

(1. 西北大学生命科学学院, 陕西 西安 710069; 2. 河南师范大学生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘要:通过温室盆栽试验,研究了小麦与谷子种群在增强 UV-B 辐射条件下个体大小等级性与异速生长的变化模式。结果如下:①UV-B 辐射处理组与对照组相比株高和生物量极显著下降($P < 0.01$),并且其株高和生物量的频率分布均向左偏移。②增强的 UV-B 辐射使小麦、谷子株高和各部位生物量的 Gini 系数极显著增大($P < 0.001$)。③在增强 UV-B 辐射下,小麦和谷子株高-生物量之间仍表现为“简单异速生长关系”($P < 0.05$),但株高-生物量之间这种关系发生较大的偏离。结果表明增强 UV-B 辐射对不同大小的植物个体影响是不均匀的。

关键词:UV-B 辐射;小麦;谷子大小;大小等级性;异速生长

文章编号:1000-0933(2007)12-5202-07 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Effects of enhanced ultraviolet-B irradiance on size hierarchy and allometry of wheat and millet in greenhouse

TIAN Xiang-Jun¹, LIN Yue¹, QIU Zong-Bo^{1,2}, LIU Xiao¹, YUE Ming^{1,*}

1 College of Life Science, Northwest University, Xi'an 710069, China 2 College of Life Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China
Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5202 ~ 5208.

Abstract: Comparisons between enhanced and ambient UV-B radiation wheat and millet individuals demonstrate profound effects of enhanced UV-B radiation on plant allometry as well as on the distributions aspects of size by the pot cultivation experiments in greenhouse. The results showed that: ①Enhanced UV-B radiation lead to a significant decrease of plant height and biomass for wheat and millet ($P < 0.01$). Meanwhile, their plant height and biomass frequency distributions under the condition of enhanced UV-B remained positively skewed. ②The Gini coefficient of plant height and biomass were increased notably by enhanced UV-B radiation ($P < 0.0001$). ③There were simple allometric relationships between plant height and biomass under enhanced UV-B radiation since these relationships were significantly linear ($P < 0.05$). But the slope of line changed by enhanced UV-B radiation. Consequently, the results implied that the depression effects of UV-B on individuals were not uniform. This allometric analysis may provide a much-needed link between individual plant behaviour to enhanced UV-B radiation and population-level processes.

Key Words: UV-B; wheat; millet size; hierarchy; allometry

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30370269;30670366);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

收稿日期:2006-10-26; **修订日期:**2007-04-29

作者简介:田向军(1981~),女,山西人,硕士生,主要从事植物生理生态学研究。E-mail: tianyefang198181@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yueming@nwnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30370269; No. 30670366) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry

Received date: 2006-10-26; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: TIAN Xiang-Jun, Master candidate, mainly engaged in plant physiology and ecology. E-mail: tianyefang198181@163.com

大气层中平流层臭氧减薄是当今全球性环境问题,由于平流层臭氧层减薄引起紫外辐射(UV-B)增强而导致严重的生态学后果,已受到国际社会的普遍关注^[1]。据有关资料反映:全球范围内的平流层臭氧浓度在过去的 10a 中平均减少了 2%~3%,目前仍呈继续降低趋势^[2]。臭氧层变薄增加到达地球表面的紫外线辐射(UV-B, 280~315nm),以致影响到植物的个体形态建成、生长发育和作物的产量^[3~5]。据现有研究,已检测到植物在紫外辐射增强条件下形态学发生变化出现的几率高于光合作用减少几率^[6,7]。即增强 UV-B 辐射条件下,植株生长和生产具有较大的可塑性。一般认为,植物的可塑性是植株异速生长或物质分配模式的改变^[8],这种改变则蕴涵着重要的生长和物质分配策略。

一些环境因素的改变可以导致植物异速生长(Allometric relationship)关系和大小等级性(size hierarchy)的改变,而这些变化反过来又影响植物对资源的利用、分配及其与邻体之间的关系^[9]。如竞争对植物生长、形态的影响以及形态对竞争反馈调节影响的重要性近年来受到了广泛重视^[10~14]。由于植物对光的竞争是不对称的,在密集的植物群体中植株高度成为决定个体生存的重要因素。而且,植物形态可能随植株大小的变化而变化。因此异速生长方法对研究植物资源分配和生长形态是非常必要的。

从目前的研究看,植物对 UV-B 辐射较一致的反应表现在形态学变化和次生代谢过程的变化,而这些变化无疑将引起种间竞争和群落结构的改变,对这一过程的把握有助于对臭氧层破坏紫外辐射增强的生态学后果的正确评价^[15]。竞争试验表明,UV-B 辐射可以改变物种竞争性平衡^[16~19],而这些研究基本上都认定,竞争性平衡的改变不是由于 UV-B 对光合作用抑制的结果,而是由植株形态和冠层结构的变化所引起^[20]。目前在另一重要全球变化——大气 CO₂ 富集的研究中,植物种群异速生长和大小等级性方面的问题已开始得到重视^[21,22]。但植物群体对增强 UV-B 响应的研究较少^[18],同时未见有从种群异速生长和大小等级性方面探讨 UV-B 对植物影响的报道。

因此,本研究选取 2 种重要农作物小麦、谷子(分别为单子叶 C₃、C₄植物),通过人工模拟臭氧层减薄 15% 的条件,研究增强 UV-B 辐射对植株异速生长及大小不等性的影响,这在全球变化理论和农业实践上具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

小麦(*Triticum aestivum*):四川绵阳 26 号。谷子(*Setaria italica*):长农 35 号。

1.2 材料培养

盆栽试验于 2005~2006 年在西北大学生命科学学院生理生态实验室温室内进行。试验所用盆钵内径 26.5 cm,高 20.0 cm,每盆装土 5kg,土壤采自西北大学生物园,土壤肥力中等。选取子粒饱满,大小均一的小麦种子于 2005 年 9 月 22 日播种,出苗后每盆定苗 15 株。在 25℃±1℃的温室中培养,规律浇水。至三叶期时,随机分为 UV-B 处理组(T)和对照组(CK)两个处理。每处理 24 盆。

1.3 UV-B 辐射处理

使用 40 W 紫外灯管(秦牌,波长峰值 313 nm,宝鸡光源研究所)进行 UV-B 辐射处理,采用升降式灯架,灯管悬于植株上方 60 cm 处,用 742 型 UV-B 辐照计(北京师范大学光电仪器厂)测定 297 nm 处的紫外辐射强度(以植株顶端计),并根据 Caldwell^[23]的公式转变为生物有效辐射(UV-B_{BE}),增加的 UV-B_{BE}为 1.18~2.54kJ·m⁻²。对照上方也悬挂灯管,但不通电,以保证两组有相同的光照条件。整个生长季根据光背景通过调节灯管与植株顶层的高度来保持紫外辐射强度。小麦进入三叶期后,从 10 月 22 日(此时西安地区日照时间较短,背景紫外辐射较低),每天补充 5h(10:00~15:00),阴雨天暂停。其间,温室内最大光合有效辐射为 640μmol·m⁻²·s⁻¹。

1.4 小麦株高及生物量的测定

12 月中旬待植株成熟后,每个处理随机选取 5 盆。将长有植株的土柱从盆中取出,放入水池中浸泡,直至土柱变得松散,然后用水冲洗根系,最后从水中取出完整的植株,冲洗根部泥土,滤纸吸干,测量单株株高。

将单株分成根、茎、叶、穗四部分,分别装入纸袋,先在烘箱 100℃ 20min,再 80℃ 烘至恒重,用电子天平称取单株各器官重量。

1.5 统计分析

均值差异性比较采用 *t*-test。Gini 系数 (Gini coefficient, GC) 反映样本的绝对变异度,其计算公式如下^[24]:

$$G = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j| / (2n^2 \bar{x})$$

对 Gini 系数选用“bootstrapping”法抽样进行统计分析,“bootstrapping”的自助样本量为 5000^[25]。统计工作在 Statistic6.0 统计分析软件下完成,Gini 系数计算及“bootstrapping”法抽样过程在 Matlab6.5 下完成。

2 结果

2.1 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子株高和生物量及其大小不等性的影响

由表 1 可以看出,增强 UV-B 处理小麦、谷子株高与对照相比极显著降低 ($P < 0.01$)。同时,增强 UV-B 使两物种的茎、叶、穗生物量及总生物量极显著下降 ($P < 0.01$),而对根部生物量却没有影响 ($P > 0.05$)。增强 UV-B 辐射条件下,小麦单株茎、叶、穗生物量及总生物量分别为 0.31、0.23、0.28、0.93 g 与对照相比,依次下降了 14.71%、8.43%、22.22%、14.77%;谷子单株茎、叶、穗生物量及总生物量与对照相比,依次下降了 24.46%、31.53%、20.45%、25.87%。表明在增强 UV-B 辐射条件下,小麦、谷子的株高和生物量具有较大的可塑性。

Gini 系数反映样本的绝对变异度。表 2 显示增强处理组株高、各部位生物量(谷子穗除外)的 Gini 系数均极显著大于对照组 ($P < 0.01$),这表明增强 UV-B 辐射条件下种群大小不整齐性增大,即个体间大小差异变大。

表 1 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子株高、生物量的影响

Table 1 Effects of Enhanced UV-B radiation on plant height and biomass of wheat and millet

物种 Species	处理 Treatment	株高 (cm 株 ⁻¹) Plant height	根重 (g 株 ⁻¹) Root weight	茎重 (g 株 ⁻¹) Stem weight	叶重 (g 株 ⁻¹) Leaf weight	穗重 (g 株 ⁻¹) Spike weight	总重 (g 株 ⁻¹) Total weight
小麦 Wheat	CK	60.10 ± 3.72	0.11 ± 0.04	0.37 ± 0.07	0.25 ± 0.04	0.36 ± 0.11	1.09 ± 0.20
	T	55.64 ± 4.80 **	0.11 ± 0.05	0.31 ± 0.09 **	0.23 ± 0.04 **	0.28 ± 0.02 **	0.93 ± 0.19 **
谷子 Millet	CK	40.36 ± 5.36	0.03 ± 0.01	0.14 ± 0.05	0.20 ± 0.05	0.09 ± 0.04	0.46 ± 0.13
	T	35.75 ± 4.21 **	0.03 ± 0.01	0.11 ± 0.02 **	0.14 ± 0.04 **	0.07 ± 0.03 **	0.34 ± 0.12 **

表中数据为平均数 ± 标准差。星号表示同一种植物不同处理之间方差分析结果的差异显著性,“*”为差异显著 ($P < 0.05$, $n = 75$),“**”为差异极显著 ($P < 0.01$, $n = 75$)

The asterisk “*”, the double asterisk “**” indicates that there is a significant difference at a level of 0.05, 0.01 between UV-B enhanced and ambient according to ANOVA ($n = 75$)

表 2 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子株高及生物量的 Gini 系数的影响

Table 2 Effects of Enhanced UV-B radiation on Gini coefficient for plant height, biomass, root weight, stem weight, leaf weight and spike weight of wheat and millet

物种 Species	处理 Treatment	株高 Plant height	根重 Root weight	茎重 Stem weight	叶重 Leaf weight	穗重 Spike weight	生物量 Total weight
小麦 Wheat	CK	0.02258	0.10132	0.05440	0.04824	0.08710	0.05364
	T	0.02731 **	0.11671 **	0.07250 **	0.05146 **	0.12644 **	0.05885 **
谷子 Millet	CK	0.03386	0.13028	0.09337	0.07541	0.11499	0.07934
	T	0.03822 **	0.14426 **	0.14313 **	0.08208 **	0.11426	0.09002 **

星号为同一种植物不同处理之间方差分析结果的差异显著性,“*”差异显著 ($P < 0.05$, $n = 75$),“**”差异极显著 ($P < 0.01$, $n = 75$)

The asterisk “*”, the double asterisk “**” indicates that there is a significant difference at a level of 0.05, 0.01 between UV-B enhanced and ambient according to ANOVA ($n = 75$)

2.2 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子异速生长模式的影响

小麦、谷子株高与生物量的异速生长关系在对照及增强辐射处理条件下均为线性的(图 1),即表现为简单的异速生长关系^[25],其异速生长表达式为 $y = a + bx$ 的形式。对照和处理条件下两物种株高-生物量拟合方程可解释绝大部分的变差($P < 0.05$)。值得注意的是,增强 UV-B 辐射使两物种的株高-生物量拟合直线更倾斜,即增强 UV-B 辐射处理组中的直线斜率比对照组大。对两物种来说,在相同株高下,增强 UV-B 辐射处理组植株更重。

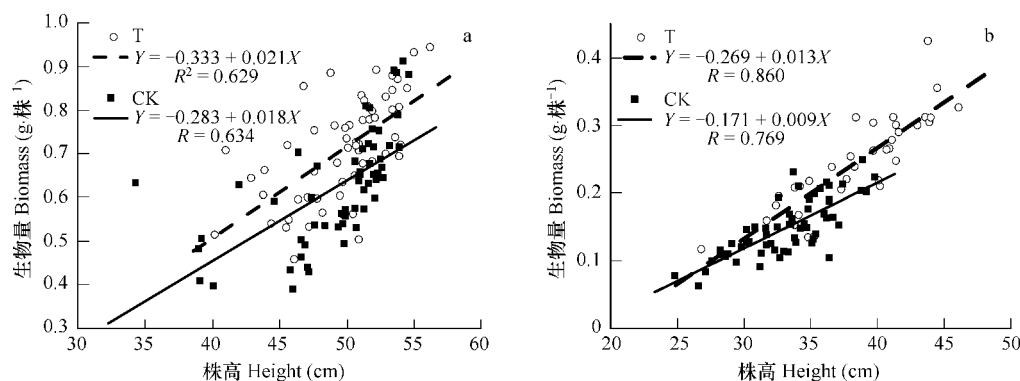


图 1 对照和处理条件下小麦(a)与谷子(b)株高-生物量的静态异速生长关系

Fig. 1 Allometric relationships between plant height and biomass for wheat (a) and millet (b) under UV-B enhanced and ambient conditions

Y 表示回归方程, R 表示回归系数 Y is for regression model, and R is regression coefficient. Both of them are shown in each graph

2.3 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子株高频率分布的影响

由图 2 可见,小麦、谷子处理组的株高频率分布表现一致,与对照组相比均向左偏移,说明增强 UV-B 辐射条件下株高生长被抑制,导致小个体数目增多。小个体数目增多明显导致平均单株生物量的减少,使增强 UV-B 辐射组单株生物量频率分布同样出现明显的左偏斜(图 3)。这说明增强 UV-B 辐射对植物生长的影响是不均匀的。

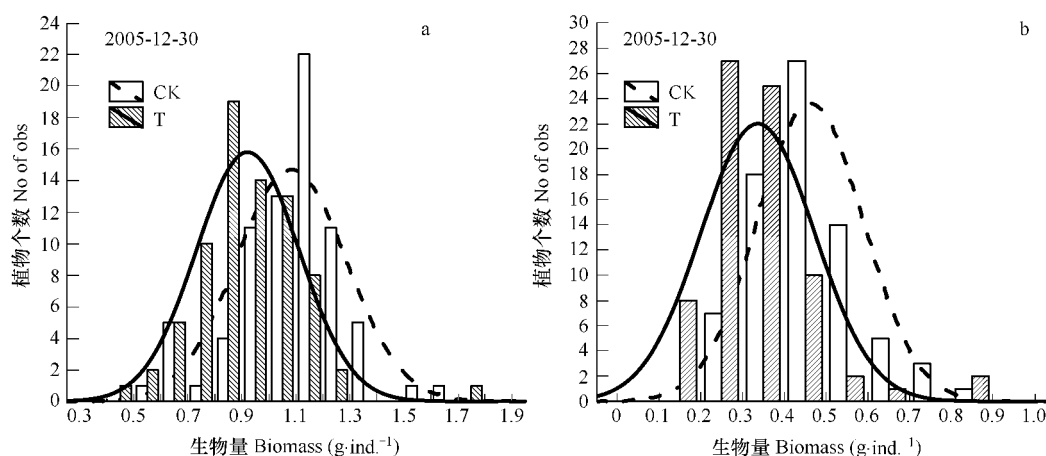


图 2 增强 UV-B 辐射条件下小麦(a)与谷子(b)生物量频率分布

Fig. 2 Biomass distributions of wheat (a) and millet (b) under enhanced UV-B radiation and ambient conditions

3 讨论

3.1 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子株高和生物量的影响

植物总生物量积累是衡量 UV-B 辐射对植物生长影响的一个很好的指标。总生物量代表所有生理、生化和生长因子长期响应的完整性。大量研究表明,即使增强 UV-B 辐射对形态过程中很微妙的影响也会积累起

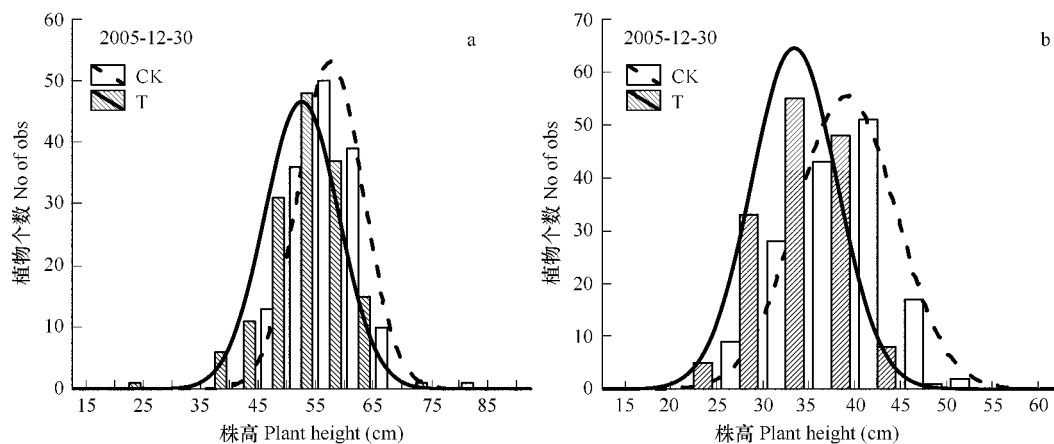


图3 增强 UV-B 辐射条件下小麦(a)与谷子(b)高度频率分布

Fig. 3 Plant height distributions of wheat(a) and millet(b) under enhanced UV-B radiation and ambient conditions

来,最终对生物量产生显著影响。这些研究较为一致的结果是增强 UV-B 辐射导致植株生物量下降^[27,28]。从表 1 可以看出,增强 UV-B 辐射下小麦、谷子株高、各部位生物量与对照相比均极显著下降,而对其根部生物量却没有影响。这可能是增强 UV-B 辐射条件下,植株为了避免 UV-B 伤害,将更多的生物量分配到根部,以最大限度获得资源,是植物对增强 UV-B 辐射的一种适应性表现。许多逆境条件都可以引起植物根部比例的增加,这可能是植株分配更多的生物量到那些能获得最多的有限资源的器官中去,这是植物对资源不均衡的主要调节机制^[29]。

3.2 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子大小不等性的影响

增强 UV-B 辐射导致株高和生物量的频率分布左偏斜(图 2)。但这种偏斜并不是由于小个体死亡而引起的频率分布左端平截,而是由于超过一定大小的植株个体数迅速减少而引起的。即在增强 UV-B 辐射条件下,植物种群由较多的小个体和较少的大个体组成。该现象反映了植物群体对增强 UV-B 辐射的一种趋避反应,这说明增强 UV-B 辐射对植物生长影响是不均匀,倾向于选择较矮的个体。竞争因素同样可以导致正态分布的偏斜,但一般情况下是右偏斜,主要是个体间对光资源的不对称竞争而引起^[30,31]。因此,UV-B 辐射与竞争的作用方式不同,竞争引起的光竞争倾向于选择高的个体,而 UV-B 辐射则相反。

从反映大小不等性的指标 Gini 系数来看,增强 UV-B 辐射使两物种 Gini 系数显著增大,表明增强 UV-B 辐射条件下种群大小不整齐性增大,即个体间大小差异变大。一般情况下,UV-B 辐射对植物产生有害的影响,高的植株在 UV-B 辐射增强条件下成为抑制类型,而小个体则成为优势类型,这种不对称影响不仅在种群水平上调节密度(自疏),也在个体水平上影响个体生长速度和个体大小,进而增加种内个体间的大小差异。

3.3 增强 UV-B 辐射对小麦、谷子异速生长模式的影响

植物个体的异速生长可被看成是由物种的遗传性所决定的一个固有特性^[32,33]。一个物种的个体异速生长关系首先被假定为是在非生物的生态因子,如水分、光照、热量及其他化学和物理条件约束下自然选择的结果^[34]。竞争改变植物的异速生长模式已有大量研究^[35~37],结果表明植物在高密度条件下,植株与生物量之间表现为“非线性的异速生长关系”。而在本研究中,增强 UV-B 辐射没有改变表征植物大小不同测量指标间的异速生长关系(图 1)。在增强 UV-B 辐射下,小麦和谷子株高-生物量之间仍表现为“简单异速生长关系”。这对这两物种来说,要么当其生长时并没有一种进化压力使之保持特定的高-重关系,要么该实验中的 UV-B 辐射剂量没有使其大小接近生物机制稳定性的极限(群体中存活所需的最小的个体大小)^[12]。但增强 UV-B 辐射使株高-生物量之间这种关系发生较大的偏离,植株高度越大偏离越明显。在相同株高下,增强 UV-B 辐射处理组植株更重。这种偏离显示出高度和重量这两个表示植株大小的指标具有较大的可塑性。

References:

- [1] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Effects of increased UV-B radiation on aquatia ecosystems in lakes. *Advances in Earth Science*, 2002, 38(2): 141 — 146.
- [2] Crutzen P J. Ultraviolet on the increase. *Nature*, 1992, 356:104 — 105.
- [3] Teramura A H. Changes in growth and photosynthetic capacity of rice with increased UV-B radiation. *Physiology Plant*, 1991, 83:373 — 380.
- [4] Teramura A H. Effects of UV-B radiation on soybean yield and seed quality: a 6-year field study. *Physiology Plant*, 1990, 80:5 — 11.
- [5] Xue H J, Wang X L, Yue M. Effects of enhanced UV-B radiation on morphology physiology and allometry of *Amaranthus retroflexus*. *Acta Bot. Boreal. Occident. Sin*, 2003, 23:(5)783 — 787
- [6] Caldwell M M, Flint S D. Stratospheric ozone reduction, solar UV-B radiation and terrestrial ecosystem. *Climate Change*, 1994, 27:375 — 394.
- [7] Searles P S. A meta-analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia*, 2001, 127: 1 — 10.
- [8] Schmid B, Weiner J Plastic relationships between reproductive and vegetative mass in *Solidago altissima*. *Evolution.*, 1993, 47: 61 — 74.
- [9] Tremmel D C, Bazzaz F A. Plant architecture and allocation in different neighborhoods: Implications for competitive success. *Ecology*, 1995, 76: 262 — 271.
- [10] Ellioson A M. Density-dependent dynamics of *Salicornia europa* monocultures. *Ecology*, 1987, 68: 737 — 741.
- [11] Geber M. Interplay of morphology and development on size inequality: A Polygonum greenhouse study. *Ecological Monographs*, 1989, 59:267 — 288.
- [12] Weiner J, Thomas S C. Competition and alometry in three species of annual plants. *Ecology*, 1992, 73 (2): 648 — 656.
- [13] Weiner J, Fishman L. Copetition and allometry in *Kochia scoparia*. *Annals of Botany*, 1994, 73:263 — 271.
- [14] Shipley B, Dion J. The allometry of seed production in herbaceous angiosperms. *The American Naturalist*, 1992, 139:467 — 483.
- [15] Li Y, Yue M. Ultraviolet radiation ecology. Beijing: China Environmental Science Press, 2000. 99 — 107.
- [16] Fox F M, Caldwell M M. Competitive interaction in plant population exposed to supplementary UV-B radiation. *Oecologia*, 1978, 36:173 — 190.
- [17] Barnes P W, Jordan P W, Gold W G. Competition, morphology and canopy structure in wheat and wild oat exposed to enhanced UV-B radiation. *Function. Ecology*, 1988, 2: 319 — 330.
- [18] Yue M, Wang X L. Effect of Enhanced UV-B Radiation on Competition Interaction of Several Plant Species Pairs. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1322 — 1326.
- [19] Li Y, Yue M, Wang X L, Hu Z D. Competition and sensitivity of wheat and wild oat exposed to Enhanced UV-B radiation at different densities under field conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 47 — 55.
- [20] Yue M, Wang X L. Effect of enhanced ultraviolet radiation on competitive balance of wheat and oat-the structure of biomass and canopy. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19 (5): 526 — 531.
- [21] Fajer E D, Bowers M D, Bazzaz F A. Performance and allocation patterns of the perennial herb, *Plantago lanceolata*, in response to simulated herbivory and elevated CO₂ environments. *Oecologia*, 1991, 87: 37 — 42.
- [22] Sandra L. Johnson, David E. Lincoln. Allocation responses to CO₂ enrichment and defoliation by a native annual plant *Heterotheca subaxillaris*. *Global Change Biology*, 2000, 6(7): 767.
- [23] Caldwell M M. In: Giese A C ed. Solar ultraviolet radiation and the growth and development of higher plant. New York: Academic Press. *Photophysiology*, 1971, 6: 131 — 177.
- [24] Weiner J. Size hierarchies in experimental populations of annual plants. *Ecology*, 1985, 66:743 — 752.
- [25] Dixon P M, Weiner J, Mitchell-Oids T, Woodley R. Bootstrapping the Gini coefficient of inequality. *Ecology*, 1987, 68:1548 — 1551.
- [26] Wiener J, Fishman L. Competition and allometry in *Kochia scoparia*. *Annual of Botany*, 1994, 73:263 — 271.
- [27] Yue M, Li Y, Wang X L. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on plant nutrients and decomposition of spring wheat under field conditions. *Environment Experiment Botany*, 1998, 40:187 — 196.
- [28] Zheng Y F, Yang Z M, Yan J Y, *et al.* Biological response of crops on enhanced solar ultraviolet radiation and its estimation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(1): 107 — 109.
- [29] Chapin F S, Bloom A J, Field C B, *et al.* Plant responses to multiple environmental factors. *Bioscience*, 1987, 37: 49 — 57.
- [30] Weiner J, Bernstson G M, Thomas S C. Competition and growth form in a woodland annual plant. *Journal Ecology*, 1990, 78:459 — 469.
- [31] Weiner J, Filsh L. Competition and allometry in *Kochia scoparia*. *Annals of Botany*, 1994, 73:263 — 271.
- [32] White J. Allowmetre interpretation of the self thinning rule. *Journal of Theoretical Biology.*, 1981, 87:475 — 500.
- [33] Menges E S. Biomass allocation and geometry of the clonal forest herb, *Lapomea Canadensis*: adaptive response to the environment or allometric

constraints. *American Journal of Botany*, 1987, 74: 551—563.

- [34] McMahon T A. The mechanical design of trees. *Scientific American*, 1975, 223:92—102.
- [35] Wiener J, Thomas S C. Competition and allometry in three species of annual plants. *Ecology*, 1992, 73:648—656.
- [36] Hisae N, Ichiro T, Sakae K. Effects of plant density on frequency distributions of plant height in *Chenopodium album* stands: analysis based on continuous monitoring of Height-growth of individual plants. *Annals of Botany*, 1995, 75:173—180.
- [37] Li Z F, Wang G. The effects of intraspecific competition on the relationship between height growth and biomass of annual plants. *Journal of Lanzhou University*, 2002, 38 (2):141—146.

参考文献:

- [1] 张运林,秦伯强,陈伟民. 增强的 UV-B 对湖泊生态系统的影响研究. *地球科学进展*, 2005, 20(1):106~112.
- [5] 薛慧君,王勋陵,岳明. 增强紫外-B 对反枝苋的形态、生理及异速生长的影响. *西北植物学报*, 2003, 23(5):783~787.
- [15] 李元,岳明. 见:紫外辐射生态学. 北京:中国环境科学出版社, 2001. 134~135.
- [18] 岳明,王勋陵. 紫外线-B 辐射对几种植物竞争的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(8):1322~1326.
- [20] 岳明,王勋陵. 紫外线辐射对小麦和燕麦竞争性平衡的影响——小麦和燕麦生物量结构与冠层结构. *环境科学学报*, 1999, 19(5): 526~531.
- [28] 郑有飞,杨志敏,颜景义. 作物对太阳紫外辐射的生物效应及评估. *应用生态学报*, 1996, 7(1):107~109.
- [37] 李仲芳,王刚. 种内竞争对一年生植物高生长与生物量关系的影响. *兰州大学学报*, 2002, 38(2):141~146.