

UV - B 辐射增强对生态系统矿质营养循环的影响*

杜彩艳^{1,2}, 祖艳群^{1* * *}, 李 元¹

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201;
2. 云南省农业科学院土壤肥料研究所, 云南 昆明 650205)

摘要: 人类活动产生的氟氯烃等化合物对大气的污染造成臭氧损耗, 引起地面 UV - B 辐射增强, 进而造成对地球生态系统的影响。本文综述了 UV - B 辐射增强对陆地生态系统和水生生态系统矿质营养影响的国内外研究态势, 尤其是对两者矿质营养循环的影响研究, 并就目前研究状况, 提出未来研究方向。

关键词: UV - B 辐射; 生态系统; 矿质营养; 循环

中图分类号: X3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004 - 390X(2004)06 - 0731 - 06

Effect of Enhanced UV-B Radiation on the Cycling of Mineral Nutrient of Ecosystem

DU Cai-yan^{1,2}, ZU Yan-qun¹, LI Yuan¹

(1. College of Resource and Environmental, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
2. Soil and Fertilizer Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: The results of studies show that enhanced Ultraviolet radiation (UV-B, radiation, broad band. 280 ~ 400 nm) on earth surface could produce negative effects on creature and would be bound to impact on ecosystems. This article mainly discuss about the effect of Enhanced UV-B Radiation on mineral nutrients of land-system and water-system with summing up the developing at home or abroad, esp. the effect of Enhanced UV-B Radiation on their cycling. According to researching situation now and suggesting to studying direction in the future.

Key words: UV-B radiation; ecologysystem; mineral nutrients; cycling

平流层臭氧减薄导致地表紫外辐射(UV-B)增强已成为越来越受关注的全球气候变化问题之一。近年来,国内外在紫外辐射对生物的影响研究方面作了大量的研究工作,取得了许多有意义的研究成果。具体分析这些研究成果,不难发现,研究主要集中在对植物的影响方面,而且主要集中在对植物个体的生理生化、生长发育的影响等方面、对生态学影响方面的研究文献甚少。我们知道;环境条件的改变,诸如气候变化、地表紫外辐射增加等,

势必影响到植物矿质营养元素的循环,进而导致生态系统的改变,会对人类产生巨大影响。营养元素循环是 UV-B 辐射对生态系统功能影响的一个重要方面,所以研究 UV-B 辐射增加对植物矿质营养元素的影响具有重大的生态和经济意义。

1 大气O₃ 减薄与地表紫外辐射增强

位于大气平流层的臭氧层能吸收对生物有害的太阳紫外辐射(UV-B, UV-C),成为地球生命的有

* 收稿日期: 2004 - 09 - 27

* * 通讯作者

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30160023;30260026)

作者简介: 杜彩艳(1977 -)女,云南维西人,硕士研究生,研究实习员,主要从事植物营养研究。

效保护层。20 世纪以来,由于氯氟烃等的大量使用和航空、航天飞行器数量的急剧增加,使排放到大气中的氯氟烃以及其它氮化物(如 NO_2 等)增加,引起臭氧层的破坏。最明显的衰减发生在南极大陆上空,形成臭氧空洞。目前,高纬度地区的臭氧比 1990 年降低了 40% ~ 50%,中纬度地区比 1980 年降低了 3% ~ 6%。在赤道附近降低不是很大。王少彬等(1993)和魏顶文等(1994)报道北京和昆明两地上空的 O_3 浓度在过去十年间分别降低了 5% 和 3%。有资料显示,在 1979 ~ 2001 年平流层的臭氧比 1980 年减少 3% ~ 6%^[1]。据推断,若不加以控制,到 2075 年臭氧层将减少 40%,将使到达地表的紫外辐射显著增加。

平流层臭氧变薄以及臭氧空洞最直接的环境效应是到达地面的具有生物效应的 UV-B(280 ~ 320 nm)辐射增强,且平流层臭氧每减少 1%,到达地表的 UV-B 辐射增加约 2%^[2]。在赤道附近和中纬度地区 1 d 到达地表的 UV-B 辐射量为 0 ~ 12 kJ/m²^[3]。据报道, O_3 层的减薄引起 UV-B 辐射增强,已经产生了严重的后果,对人、动物、植物、微生物、生态系统以及大气质量都有重大影响。

地球表面的紫外线正在威胁着地球,南极的臭氧层空洞正在扩大,据 2000 年 9 月 7 日美国宇航局发表的新闻介绍,南极上空臭氧层空洞面积已达到 2 830 万 km²,相当于美国领土面积的 3 倍。这将对植物矿质营养元素循环产生严重影响,从而势必影响到地球农田生态系统。

2 UV-B 辐射对陆地生态系统矿质营养的影响

生态系统的物质循环通常指植物矿质营养的循环,即营养元素在土壤—植物系统的循环与平衡,它是系统存在和发展的营养基础,也是系统的主要功能之一。研究发现,营养元素循环是 UV-B 辐射对生态系统功能影响的一个重要方面。

2.1 UV-B 辐射对植物必需营养吸收运输的影响

2.1.1 N

DOHLER 等^[4]曾报道,短时间(15 min)的 UV-B 胁迫对藻类吸收¹⁵ NH_4^+ 无影响,然而,经 UV-B 处理 30, 60 min,藻类对¹⁵ NH_4^+ 吸收显著下降。BRAUNE 等^[5]也报道,UV-B 处理下,鞭毛藻对 $\text{NH}_4^+ - ^{15}\text{N}$ 的吸收高于对 $\text{NO}_3^- - ^{15}\text{N}$ 的吸收,以及 UV-B 辐射显著抑制鞭毛藻对 N 的吸收。同样有材料表明,对于对 UV-B 辐射较敏感的植物,如

Glotalaria juncea 而言,在其整个生育期当中哪怕只照射 1 次(15 min),其体内全氮含量明显减少。在其它试验中也已得出相似的结论:UV-B 辐射降低烟草、黑麦和大豆中 N 吸收。TYAGI 等^[6]指出,UV-B 辐射降低稻田中蓝菌和根瘤菌的固 N 作用以及 SINS^[7]证实,在大田条件下,UV-B 辐射抑制热带豆科作物的固氮作用。

而李元等^[8]对春小麦进行研究则表明,UV-B 辐射对春小麦茎、根和穗 N 含量影响较一致,均为显著增加。其结果与 HATCHER 等^[9]增加 UV-B 辐射增加豌豆植株 N 含量相似。但也有结果表明,UV-B 辐射不影响欧洲越桔和 *Calluna vulgaris* 叶片中 N 含量。

孙谷畴等^[10]研究指出,UV-B 辐射引起生长在不同 N 源的香蕉叶片光合速率、表观量子产率和光能利用效率的下降;UV-B 辐射使生长在不同 N 源的植株叶 N 含量降低;生长在不同 N 源的香蕉植株对 UV-B 辐射有不同响应, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有利于主要光合参数增高,但其对 UV-B 辐射亦最敏感,N 供应受限制或植株生长在中性盐如 $\text{NH}_4\text{NO}_3 - \text{N}$ 则对 UV-B 辐射不甚敏感。

2.1.2 P, K

研究证实,UV-B 辐射显著降低春小麦分蘖期、成熟期叶和茎以及扬花期 P 含量,显著增加拔节期叶、茎和根、扬花期茎和根以及成熟期根和穗 P 含量,在分蘖期和扬花期中 4.25 kJ/m² UV-B 辐射下,P 含量为最大值。对于 K,UV-B 辐射显著增加春小麦 4 个生育期的叶和茎以及扬花期、成熟期穗 K 含量,而根 K 含量在分蘖期无显著变化,拔节期显著降低,扬花期和成熟期显著增加^[11]。但也有研究表明,UV-B 辐射不影响草原灌木金合欢属(*Acacia tortilis*),欧洲越桔(*Calluna vulgaris*)叶片 P 和 K 含量。

MURALI 等^[12]则发现,UV-B 影响大豆吸收 P 的速率与使用 P 的数量有关,P 较多时,UV-B 不影响 P 吸收,反之,则有影响。有材料曾指出,利用具有不同 Ca/P 比例的矿质营养溶液处理的番茄,其对 UV-B 辐射的响应不决定于 Ca/P 的比例,而是决定于 Ca 和 P 的供应水平。但也有材料指出,UV-B 辐射增加苹果整个植株对 P 的吸收。目前还缺乏直接的证据证实 UV-B 辐射对植物的 K, P 元素吸收和运转的影响。

2.1.3 Fe, Mg, Zn

李元等^[13]研究表明,UV-B辐射导致春小麦叶和穗Fe含量增加,而根Fe含量显著降低,在不同生育期,茎Fe含量随UV-B辐射变化的趋势并不一致,分蘖期和成熟期茎Fe含量显著降低,拔节期茎Fe含量无显著变化,而扬花期 2.54 kJ/m^2 UV-B辐射导致茎Fe含量显著高于对照,在 4.25 和 5.35 kJ/m^2 UV-B辐射时,茎Fe含量与对照之间无显著差异。这可能是UV-B辐射刺激了Fe从根和茎向叶和穗的运转。

UV-B辐射对叶、茎Mg和Zn含量的影响较一致,均为显著增加;而对各个生育期根Mg和Zn含量的影响则不相同,根Mg含量在分蘖期和拔节期显著增加,在扬花期和成熟期显著降低。 4.25 kJ/m^2 UV-B辐射导致分蘖期、扬花期和成熟期根Zn含量最高,而在 4.25 kJ/m^2 UV-B辐射时,拔节期根和成熟期Mg含量显著降低,而Zn含量显著增加^[14]。

但也有研究证实,UV-B辐射阻碍草原灌木金合欢属 *Acacia tortilis* 中Mg,Fe从子叶向幼苗移动,不影响Zn从子叶向幼苗移动和从老叶向幼苗运转,以及降低大豆Mg吸收,减缓棉花中Zn从子叶向幼苗移动。

UV-B辐射对植物营养元素影响的差别可能与植物种类、生育期、营养元素和其它环境条件有关。植物营养含量对UV-B辐射的响应是复杂的,是各种生理和营养代谢过程的结果。研究证实,UV-B辐射对植物营养含量的影响,一是可能与代谢酶有关;UV-B辐射可能通过抑制硝酸还原酶和N代谢过程中其它关键酶的作用,从而影响了硝酸还原酶和氨的吸收过程;或可能由于吸收较多的 NO_3^- 或细胞中出现了特殊的UV-B光受体。二是UV-B辐射对膜吸收功能的伤害;三是UV-辐射通过影响光系统II中心而抑制ATP合成;从而降低根发育和根系的吸收能力,影响植物的N吸收。四是叶片中叶绿素(CHO)含量变化可能直接影响营养吸收,也可能影响根生长,从而导致营养吸收的变化^[15]。

2.2 UV-B辐射对植物营养累积的影响

N,P,Fe是植物正常生长发育的必需元素。李元等人^[8,13]研究证实,紫外辐射增强对3种元素在植物体内的累积及在植物—土壤系统中的迁移均有影响。在增强紫外辐射照射情况下,春小麦群体N,P元素总累积量较对照植株下降17.68%和28.89%,同时也降低春小麦N,P元素的输出。由

于植物—土壤系统中输入/输出平衡破坏,N,P循环功能下降。紫外辐射增强对Fe元素积累、迁移的影响同前述相似,虽然在春小麦的不同生育期、不同部位的变化趋势不尽一致,但其植株总累积量随紫外辐射增加而下降,降幅约为40.54%,其结果同样是Fe循环失衡。

营养元素累积是生物量降低和营养含量变化共同作用的结果。大量的研究表明,增强的UV-B辐射能降低作物总生物量^[16]。在UV-B辐射导致春小麦各部位生物量和营养含量均发生变化的情况下,各部位营养累积与生物量之间具有较好的相关性(根除外),在多数植物的部位中,K,Mg和Fe累积与生物量的相关性达到显著水平,仅根生物量与根中各营养累积的相关性均不显著。N,P,K,Mg和Fe总累积与总生物量之间呈显著正相关。总体上,营养累积与营养含量之间相关性较差,在各部位中,N和K累积与其含量之间的相关性不显著,仅Mg累积与其含量在叶、茎、穗和籽粒中的相关性达到显著水平。可能生物量比营养含量的贡献更大^[17]。对于燕麦,UV-B辐射对其K,P的积累和分配有一定作用,但影响的方向与生物量分配并不完全一致。UV-B辐射对燕麦各器官生物量分配影响很小,然而各器官中K积累量则表现出复杂的变化格局,但总的积累量下降,与生物量的变化一致。P的情况与K的类似^[18]。有资料证实,在对毒鱼草(*Verbascum thapsus*)3个群和一枝黄花属(*Solidago*)5个种的研究发现,生物量分配与不同的化学元素的分配是非常不同的,而且种群间生物量分配格局的变化趋势不能反映其元素积累的数量上的趋势。这反映出UV-B辐射对植物营养累积的影响依赖于物种、生育期、营养元素和其它条件。

李元等根据UV-B辐射下,春小麦群体4个生育期的总营养累积,采用统计分析法建立模型,得出总营养累积 y 与UV-B辐射($x_1, \text{kJ/m}^2$)和生育期(x_2, DAP)之间的二元回归模型,对春小麦群体分蘖期、拔节期和扬花期的总营养累积及成熟期的总营养累积进行分析,结果表明,春小麦群体总营养累积随UV-B辐射增加而降低,其降低速率因营养元素不同而有差异,K的降低速率最大,Mg和Zn的最小。同时,总营养累积还随DAP增加而增加,其增加速率也因营养元素而异,K的增加速率最大,P的最小。利用此模型可以预测春作物群体营

养元素总累积随 UV-B 辐射和生育期变化的情况。然而,目前 UV-B 辐射增强对植物群体营养累积和物质循环的影响了解甚少,有待进一步研究。

2.3 UV-B 辐射对土壤营养有效态含量的影响

UV-B 辐射增强对土壤营养元素有效态含量有显著影响,主要表现为先下降后上升。研究证实,在 UV-B 辐射下,春小麦成熟期土壤有效 N,有效 P,有效 K,有效 Fe,有效 Zn 以及交换性 Mg 的含量增加(Zn 不显著),并与春小麦群体营养输出呈负相关。其中,P 相关性极显著,Mg 相关显著。有效营养含量的增加可能标志着土壤库中有效营养贮量增加。目前对这方面的研究比较有限,需要进一步深入研究。

3 UV-B 辐射增强对水生生态系统矿质营养元素循环的影响

大多数微量营养元素,如 Fe, Mn, Cu 和 Co/维生素 B₁₂ 等,似乎都受 UV-B 辐射的影响。一些毒性微量元素,如 U 和 Hg 可能也受 UV-B 辐射的影响,而其他微量金属营养元素,如 Ni, Se 和 Al 至今还未见相关报道。

3.1 Fe

Fe 是一种海洋浮游植物生长的重要营养元素之一。增加 Fe 的浓度可以助长海洋浮游植物生长从而可增加海洋基础产率。Fe 对海洋浮游植物生长效应实验表明,叶绿素含量可随 Fe 浓度的增加而增高。

相反,低 Fe 浓度的海洋环境将抑制海洋浮游植物的生长,影响其基础产率。如高纬度南、北太平洋表层海水中的溶解 Fe 浓度较低(0.005 ~ 0.1 nmol/L),影响了浮游植物的生长^[18,19]。UV-B 辐射对 Fe 的光效应是增加 Fe 可溶性,从而增加生物的可利用率。因此 UV-B 辐射对 Fe 的光效应对海洋浮游植物的生长是一种潜在的正效应。

高纬度海水中 Fe 的来源估计主要是通过矿物质的大气气溶胶的输送。估计只有 1% ~ 10% 的气溶胶颗粒 Fe 溶解在表层海水。其溶解部分可按海洋浮游植物所利用。其余的 90% ~ 99% 被损失掉^[20]。Fe 的可利用性对海洋浮游植物的生长是很重要的,高纬度 UV-B 通量的增加使不溶的海洋胶体 Fe 变成可溶性,从而成为生物可利用 Fe。

UV-B 辐射和可见光都能对 Fe 的光化溶解过程产生作用,但 UV-B 辐射的光电子效应更强。Fe

氧化物在紫外 310 nm 和 360 nm 波段有吸收。因此,极地臭氧洞导致的 UV-B 通量的增加将提高 Fe 在高纬度表层海水溶解度和生物可利用性,从而增加海洋基础生产率。

3.2 Cu

Cu 是质体蓝素的一组分,在海洋浮游植物光合作用的电子输送链过程中起到一些作用。对某些海洋浮游植物和细菌在氨氧化或 Cu, Zn 超氧化物歧化中可能是重要的。但过量的 Cu 对大多数海洋浮游植物来说是有毒性的。

与 Fe 相反,UV-B 对 Cu 的光效应,使其产生更大的毒性,对海洋浮游植物的生长是一种潜在的负效应。UV-B 可以通过金属配位电子反应把复合 Cu²⁺ 光降解到 Cu⁺^[21]。Cu⁻ 具有与 Cu²⁺ 不同的配位化学,Cu²⁺ 可在海水中与氯离子配位。Cu²⁻ 分子可以再被氧化并可通过有机配位重新复合。这种游离 Cu²⁺ 和 Cu⁺ 可被细胞摄取。

3.3 Mn

Mn 是一种对许多海洋有机体有利的微量营养元素,海洋植物对 Mn 的需求量是相当高的。根据热力学原理,Mn 在氧化水环境中是以不可溶的 MnO₂ 形式存在,所以不能直接被海洋植物所利用。但在表层海水中,由于光化作用,大多数 Mn 的存在形式可得到改变,成为可溶性。海水中 MnO₂ 的溶解度与光效应有关。⁵⁴MnOx 在海水中的溶解度光效应试验表明,随着光强度的增加,⁵⁴MnOx 的溶解度有明显增高。但 Mn 的溶解性可能主要依赖于可见光,紫外光在二价 Mn(Mn²⁺)到 MnO₂ 的氧化作用过程中所起的作用可能是轻微的^[22,23]。

3.4 微量元素

微量元素,如毒性微量元素 U 和 Hg 可能也受 UV-B 的影响,而象 Zn, Ni, Se 和 Mo 似乎无光化学反应^[24]。

4 UV-B 辐射增强对重金属污染的影响

自然界中植物常很难只受单一胁迫因子如 UV-B 辐射作用。相反植物总要对几种因子作出综合响应。UV-B 的辐射效应可能被某些其它因子的影响大为修改,在某些情况下,使 UV-B 效应增强,某些情况下会改善 UV-B 对植物的总体影响。但目前这方面的研究还相当少。

许多研究结果表明,增强 UV-B 辐射和重金属

Cd²⁺污染都会影响植物细胞代谢,生长发育,改变植株形态结构,导致生物量下降。强维亚等^[25]以大豆为材料,研究了重金属 Cd²⁺ 和增强的 UV-B 辐射复合对大豆生长和生理代谢的影响,结果表明, Cd²⁺ 和 UV-B 辐射都抑制大豆的生长,并显著抑制根伸长,二者复合后加强对根伸长的抑制。UV-B 辐射显著增强了 POD, SOD 活性, Cd²⁺ 对 POD 活性影响不明显,但却拮抗 UV-B 对 POD 活性的诱导。SOD 活性在各种胁迫下显著增强。Cd²⁺ 对叶片类黄酮含量影响不明显,但对 UV-B 诱导的类黄酮合成有一定影响。IAA 氧化酶活性在复合作用下下降。这可能是复合胁迫影响大豆生长的重要因素之一。强维亚等^[26]还报道, Cd²⁺ 污染促进了大豆根系有机化合物(如有机酸、氨基酸、多肽和酰胺等)的分泌,但该分泌作用受 UV-B 辐射的抑制。增强 UV-B 辐射本身对根系有机物质的分泌的影响不明显,但复合胁迫下,增强 UV-B 辐射却明显抑制 Cd²⁺ 胁迫下的根系分泌有机物质的分泌。可能是增强 UV-B 辐射也影响到了根系的代谢活动,引起碳、氮代谢和酸碱调节的变化。较高浓度 Cd²⁺ 和较强的 UV-B 辐射对大豆根系有机硫分泌有协同促进作用, N 素含量主要受 Cd²⁺ 胁迫影响,增强的 UV-B 辐射对根际环境中 N 素有一定影响,但不显著。这说明增强的 UV-B 辐射在一定程度上影响 Cd²⁺ 胁迫下大豆根系有机化合物的分泌作用,而且可能与大豆根系对重金属毒害的抗性有关。陈愚等^[27]研究指出, Cd²⁺ 对硝酸还原酶中的巯基有很高的亲和性,可导致植物体内硝酸还原酶活性下降而影响氮素的吸收。与 UV-B 辐射复合作用时, Cd²⁺ 仍是影响大豆根际环境中 N 素变化的主要因素。

RAI 等人^[28,29]研究了 UV-B 辐射与 Cu, Pb 相互作用对鱼腥藻生长的影响。结果表明, UV-B 辐射增强,使鱼腥藻细胞质膜透性上升,促进了 Cu, Pb 向藻体内迁移,进而抑制光合作用及 N、P 等素的吸收与代谢。LARSON 等人^[30]发现,蔓青在紫外辐射与 Cd 相互作用下,光合作用的非光化学淬灭降低。叶片中 Fe, Mg, Cu, P, Ca, K, S, Zn 的积累增加。Mn 含量降低,暗示同 Cd 不可逆竞争金属元素在酶中的结合位点及提高细胞膜脂过氧化反应有关。其最终结果是抑制植物生长。

5 未来的研究方向

(1) 确定 UV-B 对植物矿质营养元素的影响

及其相互关系。探索通过调控农田生态系统中矿质营养来减轻 UV-B 伤害的途径。

(2) 研究植物受 UV-B 辐射时的矿质营养响应。探讨相应的植物营养及施肥策略。

(3) 植物体中,往往有一些能吸收 UV 的物质,如类黄酮等,这些物质在植物体内的含量往往通过某种营养元素而得到增强。也就是,在施肥上可采取一些措施,增加植物体内类黄酮等物质含量,以过滤掉植物体内紫外线吸收量。

(4) 建立 UV-B 增加, CO₂ 浓度增加、气温升高及水分变化影响下植物矿质营养变化的多维模式。从而对未来气候变化趋势及其对生态系统影响作出全面而准确的评价。

[参 考 文 献]

- [1] UNEP. Executive Summary. Final of UNEP/WMO Science Assessment of Ozone Depletion. Prepared by the Science Assessment Panel of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer[J]. UNEP, Nairobi, 2002.
- [2] 魏鼎文,赵延亮,秦芳,等. 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化[J]. 科学通报, 1994, 39(6): 1 509 - 1 511.
- [3] Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), 2002. Atmosphere Chemistry and Dynamics Branch (Online). Available at <http://toms.gsfc.nasa.gov/ery-uv/euv.html> (verified 5 May 2003).
- [4] DOHLER G, WORREST R C, BIEMANN I, et al.. Photosynthetic ¹⁴CO₂ fixation and [¹⁵N] - ammonia assimilation during UV - B radiation of *Lithodesmi*[J]. *PHYSIOL. PLANTMOM*, 1987, 70: 511 - 515.
- [5] BRAUNE W, DOHLER G. Impact of UV-B radiation on ¹⁵N - ammonium and ¹⁵N - nitrate uptake by *Haematococcus lacustris* (volvocales) I. Different response of flagellates and aplanospores[J]. *Plant Physiol.*, 1994, 144: 38 - 44.
- [6] TYAGI R, SRINIVAS G, VYAS D, et al.. Differential effect of ultraviolet-B radiation on certain metabolic process in a chromatically adapting *Nostoc*[J]. *Photochem. Photobiol.*, 1992, 55 (3): 401 - 407.
- [7] SINGH A. Increased UV-B radiation Reduces N₂ - Fixation in Tropical Leguminous Crops[J]. *Environmental Pollution*, 1977, 95(3): 289 - 291.
- [8] 李元,王勋陵. UV - B 辐射增强对麦田生态系统 N, P 营养和循环的影响[J]. *农业环境保护*, 2000, 19(3): 129 - 132.
- [9] HATCHER P E, PAUL N P. The effects of elevated UV - B radiation on herbivory of pea by *Autotropha gamma*[J].

- Entomologia Exp. Et et Applicata, 1994, 71: 227 - 232.
- [10] 孙谷畴, 赵平, 曾小平, 等. UV - B 辐射对香蕉光合作用和不同氮源利用的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 317 - 324.
- [11] 李元, 王勋陵. 田间增强 UV - B 辐射对麦田生态系统 K 营养和累积的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(2): 313 - 317.
- [12] MURALI N S, TERAMURA A H. Effects of ultraviolet - B irradiance on soybean. VII. Biomass and concentration and uptake of nutrients at varying P supply[J]. Plant Nutr., 1985b, 8: 177 - 192.
- [13] 李元, 王勋陵, 胡之德. 田间增强 UV - B 辐射对麦田生态系统 Fe 营养和累积的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 36 - 39.
- [14] 李元, 王勋陵, 胡之德. 增强的 UV - B 辐射对麦田生态系统 Mg 和 Zn 营养和循环的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1): 26 - 29.
- [15] 李元, 王勋陵. 紫外辐射增加对春小麦生理、产量和品质的影响[J]. 环境科学学报, 1998a, 18(5): 504 - 509.
- [16] YUE MING, LI YUAN, WANG Xun - ling, et al. . Effects of enhanced ultraviolet - B radiation on plant nutrients, decomposition and leaf quality of spring wheat under field conditions[J]. Environ Exp Bot, 1998, 40: 187 - 196.
- [17] LI Yuan, ZU Yan - qun, CHEN Jian - jun. Intraspecific responses in crop growth and yield of 20 soybean cultivars to enhanced ultraviolet - B radiation under field conditions [J]. Field Crops Research, 2002, 78(1): 1 - 8.
- [18] MARTIN J H, STEVE E F. Iron efficiency limits Phytoplankton growth in the north-sast Pacific subarctic[J]. Nature, 1988, 331: 341 - 343.
- [19] MARTIN J H, GOEDON R M, STEVE E F, et al. . Phytoplankton iron studies in the of Alasks[J]. Deep - Sea, 1989, 7: 274 - 281.
- [20] DUCE R S. The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus and iron species on marine biological productivity[A]. In: The Role of Air-sea Exchange in Geochemical Cycling [C], Ed by Buat-Menard P and P and Reidel. D. Dordrecht, 1986, 497 - 539.
- [21] MOFFETT J W, ZIKA R G. Photochemistry of copper complexes in sea water[A], In: Photochemistry of Environmental Aquatic Systems[C]. Ed, by Zika RG and copper WT. ACS symposium, Series 327, Washington DC, 1987, 116 - 130.
- [22] SUNDA W G, HUNTSMAN S A. Effect of sunlight and anthropogenic in atmospheric solar attenuation on manganese redox cycles in surface seawater[A], In: Effect of solar Ultraviolet Radiation on Biogeochemical dynamics in aquatic environments[C]. Ed. By Blough NV and Zepherc, Woods Hole Oceanographic Institution, Technical Report, 1990, 104 - 107.
- [23] SUNDA W G, HUNTSMAN S A, HARVEY G R. Photoreduction of manganese oxides in seawater and its geochemical and biological implications[J]. Nature, 1983, 301: 234 - 236.
- [24] PALENIK (B). Potential effect of Uvib on chemical environment of marine organisms[J]. A review Environmental Pollution, 1991, 70: 117 - 130.
- [25] 强维亚, 杨晖, 汤红官, 等. 重金属(Cd)和增强 UV - B 辐射复合对大豆生长和生理代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(2): 235 - 238.
- [26] 强维亚, 陈拓, 汤红官, 等. Cd 胁迫和 UV - B 增强辐射对大豆根系分泌物的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 293 - 298.
- [27] CHEN Y, REN J C, CAI X M. Effects of cadmium on nitrate reductase and superoxide dismutase of submerged macrophytes. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18: 313 - 317. (in Chinese with English abstract).
- [28] RAI L C, TYAGI B, MALLICK N. Alteration in photosynthetic characteristics of Anabaena doliown following exposure to UV - B and ph[J]. Photochem. Photobiol., 1996, 64: 658 - 663.
- [29] RAI L C, TYAGI B, MALLICK N, et al. . Interactive effects of UV - B and copper on photosynthetic activity of the cyanobacterium Anabaena doliolum[J]. Environ. Exper. Bot., 1995, 35: 177 - 186.
- [30] LARSON E H, BOMMAN J F, ASP H. Influence of UV - B radiation and Cd chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in Brassica napus [J]. J. Exp. Bot., 1998, 49: 1 031 - 1 039.
- [31] 李元, 岳明. 紫外辐射生态学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.