



# 紫外辐射变化 及其作物响应

郑有飞 吴荣军 著


 气象出版社  
China Meteorological Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

国家自然科学基金(编号:40775072,40175029)资助

# 紫外辐射变化及其作物响应

郑有飞 吴荣军 著

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

本书是一本介绍地表紫外辐射变化特征及其对农作物和农田生态系统影响前沿研究的方法论和最新研究成果的著作。内容涉及大气臭氧和地表紫外辐射变化特征的研究进展,及地表紫外辐射增强对作物生长、发育、品质和产量的国内外研究进展。同时,该领域研究的方法论和中国区域的臭氧和紫外辐射变化特征也得到了阐述。此外,重点介绍了地表 UV-B 增强对作物生长、发育、品质、产量和农田生态影响的研究成果,评估了地表 UV-B 辐射对我国农作物产量的影响,并在全球气候变化背景下,将 UV-B 辐射胁迫效应与气候变化和其他环境因子对作物的胁迫相结合,综合评估了全球气候变化、UV-B 辐射及其他环境因子对作物产量的影响。这将从全球气候变化与环境变化层面为我国今后的粮食安全问题的解决提供科学依据和决策支持。

本书介绍的方法论和最新研究成果不仅适用于大气物理学与大气环境、气候变化和农业气象等专业领域,还适用于风险评估、可持续发展等方面。本书也可供以上学科领域的研究和教学人员参考,同时可作为研究生和本科生的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

紫外辐射变化及其作物响应/郑有飞,吴荣军著. —北京:  
气象出版社,2009.4

ISBN 978-7-5029-4733-0

I. 紫… II. ①郑…②吴… III. 紫外辐射-作用-作物-研究  
IV. Q682 S31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 051948 号

Ziwai Fushe Bianhua jiqi Zuowu Xiangying

## 紫外辐射变化及其作物响应

郑有飞 吴荣军 著

---

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:陈 红 林雨晨

封面设计:王 伟

责任校对:永 通

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:368 千字

版 次:2009 年 4 月第 1 版

定 价:70.00 元

邮 政 编 码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

终 审:纪乃晋

责任技编:吴庭芳

印 张:14.25

印 次:2009 年 4 月第 1 次印刷

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

# 前 言

大气平流层臭氧强烈吸收短波太阳紫外辐射(UV-B, UV-C),使地球生物得以正常生长,从而成为地球生命的有效保护层,被称之为“好臭氧”。然而,由于人类活动排放的大量氯氟碳化物和氮氧化物等气体进入平流层,导致大气平流层臭氧减少,地球南极上空“臭氧洞”加剧,以及中高纬度地区相当大的臭氧浓度衰减。根据世界气象组织(WMO)评估公报(2002),在1997—2001年期间,全球平均臭氧总量比1964—1980年全球平均臭氧量减少了3%,而且,这种趋势还将加剧,预计到2010—2019年期间,平流层臭氧浓度下降将最为严重。

平流层臭氧浓度的减少,使得到达地面的紫外辐射显著增加。UV-B作为其中一种对地球生物有着较强胁迫作用的紫外波段,其单独作用或与在全球气候变化背景下其他因子的复合作用对农作物和农田生态系统的影响研究在国内外已经开展得较为广泛。UV-B辐射增强可以使作物植株矮化、叶面积减少、发育迟缓、光合作用和蒸腾作用下降、产量下降、作物品质发生变化,影响种间竞争,影响整个农田生态系统,甚至更深入一步,如影响作物的各种活性酶,在分子和细胞水平产生负面效应等。

我们课题组在国家自然科学基金面上项目“地表紫外辐射增强特征及其对我国农业生态的影响”(编号:40175029),教育部高等学校骨干教师资助计划,中国气象局青年气象科学基金,教育部留学回国人员科研启动基金,江苏省“333工程”二期资助计划和江苏省“六大人才高峰”资助项目等项目的支持下,开展了大量的研究,并取得了丰富的研究成果,主要包括:利用卫星观测的TOMS资料对我国区域上空的臭氧总量多年纬向偏差分布、年际变化、周期分布等特征进行了分析;建立了紫外辐射计算模式,同时采用简化的辐射传输模式、离散坐标(DISORT)辐射传输算法、气候学经验模式计算的方法研究地表紫外辐射的大小,并通过对逐日紫外辐射的观测资料分析,研究了南京地区紫外辐射变化规律,来验证建立的紫外辐射计算模式;根据大气臭氧总量的变化计算了未来地表紫外辐射的变化,探讨了大气臭氧总量的变化与地表紫外辐射变化的数量关系;根据建立的计算模型,研制了可用于气象部门进行紫外指数预报的计算机系统;通过田间和室内试验研究,研究了UV-B辐射对作物叶面积、发育期、光合作用、蒸腾量、作物经济学产量、作物穗数、粒数、粒重等产量指标和类黄酮含量的影响;开展了UV-B辐射增强对农作物影响的模式研究,耦合到传统的农作物生长模型,提出在气候变化条件下更加适宜的农作物生长模型,开展UV-B辐射增强对农作物及农业生产影响的定量评估;开展多个因子的交互作用对农作物的影响研究,提出其他环境因子发生变化时紫外辐射对农作物影响的定量评估方法。因此,课题组全面系统地研究了地表紫外辐射特征及其作物的响应,共发表学术论文近70篇,其中被SCI收录6篇,被EI收录9篇,被ISTP收录9篇。

农作物的生长、发育和产量形成离不开农田生态系统中多种环境因子的共同作用,仅仅研究一种因子很难正确评价其实际的生物学效应。现在气候变化对作物影响的模式研究还在不断地完善中,需要不断增加环境影响因子,使得研究更符合实际,可以提高模型的准确性。同

时,地表  $O_3$  在不断增加,特别是长江三角洲地区的地表臭氧处于我国的高值区。因此,我们将在 2007 年立项的国家自然科学基金面上项目“地表 UV-B 和  $O_3$  增加对农作物复合影响的数值模拟研究”(编号:40775072)的资助下,进一步开展 UV-B 辐射与地表  $O_3$  的复合影响研究,并结合全球气候变化,更好的评估全球变化对作物和粮食安全的影响。

为进一步总结课题组在地表紫外辐射变化特征及作物响应研究领域的研究成果,本书回顾和总结了大气臭氧和地表紫外辐射变化特征的研究进展,及地表紫外辐射增强对作物生长、发育、品质和产量的国内外研究进展(第 1 章),同时,阐述了地表紫外辐射变化特征和作物响应的研究方法(第 2 章)。在此基础上,本书全面系统地总结了中国区域的臭氧和紫外辐射特征(第 3 章)、地表 UV-B 增强对作物生长、发育和产量(第 4 章),以及作物品质(第 5 章)和农田生态(第 6 章)的影响的研究成果。在上述研究的基础上,本书进一步开展了地表 UV-B 辐射对农作物产量的影响评估(第 7 章),并在全球气候变化背景下,将 UV-B 辐射胁迫效应与气候变化和其他环境因子对作物的胁迫相结合,综合评估全球气候变化、UV-B 辐射及其他环境因子对作物产量的影响(第 8 章)。这将从全球气候变化与环境变化层面为我国今后的粮食安全等相关问题的决策提供科学依据。

正如前面所述,本书是国家自然科学基金等科研课题的研究成果,也是紫外辐射及作物响应这一交叉领域最新研究成果的全面系统的总结。本专著的产生,是我国相关领域研究学者深入的研究成果,更是本课题组成员以及我校环境科学与工程学院相关科研人员的辛勤劳动,包括王传海副教授、何都良副教授、万长建高工、徐建强副教授、宋玉芝副教授、胡正华博士和赵晓莉博士等对本书研究成果的贡献,以及统稿过程中提出的宝贵意见。同时,博士生刘建军、麦博儒,硕士生蔡子颖、刘宏举、石春红、牛鲁燕等为本书的统稿和部分图表的制作做出了巨大的努力。在此一并表示衷心的感谢。

限于作者的学术水平,本书还存在着许多不足及遗漏之处,恳请读者指正。

郑有飞

2008 年 10 月 26 日

## 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 大气臭氧(O <sub>3</sub> )变化研究现状	(2)
1.2 UV-B 辐射对农作物影响的研究进展	(5)
1.3 UV-B 辐射对农田生态系统的影响	(13)
1.4 UV-B 辐射与其他环境因子的协同作用	(16)
1.5 UV-B 辐射的作物响应研究领域亟须开展的工作	(20)
参考文献	(21)
第 2 章 研究方法	(29)
2.1 地表紫外辐射观测与计算方法	(30)
2.2 大田试验设计及分析与测定方法	(44)
2.3 小结	(57)
参考文献	(58)
第 3 章 臭氧及地表紫外辐射量变化	(60)
3.1 中国区域的臭氧时空分布规律	(60)
3.2 臭氧未来的变化趋势	(70)
3.3 地表紫外辐射变化规律	(79)
3.4 臭氧减少与地表紫外辐射增强	(84)
3.5 小结	(86)
参考文献	(87)
第 4 章 UV-B 辐射对作物生长发育及产量的影响	(90)
4.1 UV-B 辐射增强对大豆的影响	(90)
4.2 UV-B 辐射增强对小麦的影响	(104)
4.3 UV-B 增强对棉花的影响	(117)
4.4 UV-B 增强对玉米的影响	(120)
4.5 UV-B 辐射增强对不同作物影响比较	(132)
4.6 小结	(148)
参考文献	(149)
第 5 章 UV-B 辐射对作物品质的影响	(151)
5.1 UV-B 辐射增强对小麦品质的影响	(151)
5.2 UV-B 辐射增强对棉花品质的影响	(154)
5.3 UV-B 辐射增强对玉米品质的影响	(157)

---

5.4 小结 .....	(161)
参考文献 .....	(162)
<b>第 6 章 UV-B 辐射增强对农田生态的影响 .....</b>	<b>(163)</b>
6.1 UV-B 辐射增强对作物群体结构的影响 .....	(163)
6.2 UV-B 辐射增强对农田杂草、病虫害和土壤动物的影响 .....	(166)
6.3 UV-B 辐射对农田小气候的影响 .....	(172)
6.4 小结 .....	(195)
参考文献 .....	(195)
<b>第 7 章 地表 UV-B 辐射变化对我国作物生产的可能影响 .....</b>	<b>(197)</b>
7.1 未来紫外辐射变化 .....	(197)
7.2 地表 UV-B 辐射变化对我国作物生产的可能影响 .....	(198)
7.3 小结 .....	(201)
参考文献 .....	(201)
<b>第 8 章 紫外辐射胁迫与气候变化的影响评估 .....</b>	<b>(202)</b>
8.1 气候变化对我国作物生产的影响 .....	(202)
8.2 紫外辐射胁迫与气候变化对大豆的影响评估 .....	(204)
8.3 紫外辐射胁迫与气候变化对小麦的影响评估 .....	(207)
8.4 UV-B 辐射胁迫与气候变化对我国 NPP 的影响评估 .....	(212)
8.5 小结 .....	(218)
参考文献 .....	(218)
<b>附:该领域发表的主要学术论文 .....</b>	<b>(220)</b>

# 第 1 章

## 绪 论

臭氧( $O_3$ )是由三个氧原子构成的氧分子异形体,在大气分子中臭氧所占比例不到百万分之一,却是重要的大气微量气体。全球平均整层气柱大气臭氧( $O_3$ )含量为  $0.3 \text{ cm(STP)}$ [标准温度和气压,STP]或者  $300 \text{ DU}$ [ $1 \text{ DU} = 10^{-3} \text{ cm(STP)}$ ],对流层大气中  $O_3$  含量不到整层大气  $O_3$  含量十分之一,大多分布在  $10 \sim 50 \text{ km}$  的中层大气中,主要集中在平流层,极大值在  $20 \sim 25 \text{ km}$  附近。

$O_3$  是影响对流层-平流层大气动力、热力、辐射、化学等过程的关键因子之一,并对地球气候和地球生态环境产生巨大影响。平流层  $O_3$  可强烈吸收太阳紫外辐射,在很大程度上决定了平流层和对流层顶的温度;同时,臭氧在可见光谱区和红外光谱区有许多吸收带,特别是在  $9.6 \mu\text{m}$  处有一很强的吸收带,因而又是一种重要的“温室”气体,在平流层上层产生冷却效应,而在平流层底层和对流层产生增暖效应。

另外,太阳紫外(UV)辐射依生物学效应的不同可分为三类:超强效应波段(UV-C,  $200 \sim 280 \text{ nm}$ ),属灭生性辐射;强效应波段(UV-B,  $280 \sim 315 \text{ nm}$ ),为生物有效辐射;弱效应波段(UV-A,  $315 \sim 400 \text{ nm}$ ),对生物影响不大。而平流层  $O_3$  能吸收全部的 UV-C 和 90% 的 UV-B,使得到达地表的太阳紫外辐射大大减少。

通过对近年来探测资料的分析研究表明,人类活动排放的大量的化学物质,如氟氯碳化物——CFCs、含溴卤代烃化合物——Halons 等,能导致平流层  $O_3$  浓度减少。根据世界气象组织(WMO)评估公报(2002),在 1997—2001 年期间,全球平均臭氧总量比 1964—1980 年全球平均臭氧量减少了 3%,而且,这种趋势还将加剧,预计 2010—2019 年期间,平流层臭氧水平下降将最为严重(Valkama 等,2003)。

随着大气平流层  $O_3$  浓度下降,地表 UV-A 和 UV-B 的辐射大大增加,尤其是 UV-B 辐射增加较为明显。据研究报道,平流层  $O_3$  浓度每减少 1%,到达地表的太阳 UV-B 辐射增加 2%。同样,根据 WMO 评估报告(2002)显示,由于臭氧的减少,全球绝大部分地区紫外辐射强度均有明显地升高。尽管 WMO 2002 年和 2006 年的评估报告均报道了平流层臭氧目前存在一个短暂的恢复过程,在未来几十年内到达地面的紫外辐射可能存在减少的趋势,但是初步预计直到 2040—2070 年左右才可能恢复到 1980 年左右的水平,且在南半球这种现象可能会更晚出现。而且,根据 GISS 模型估算,2010—2020 年,地表紫外辐射强度仍将会有 20%(北半球)~40%(南半球)的增加(Taalas 等,2000)。此外,最新的报告(WMO,2007)还指出,由于气候、云、气溶胶以及空气污染的变化对紫外辐射的变化所起的作用越来越显著,这使未来紫外辐射的增加或减少变得更加的不确定。而地表紫外辐射的增加对地表生物、生态系统和人类活动将产生深远的影响,尤其对农业生产的影响更大,且更为直接。



## 1.1 大气臭氧(O<sub>3</sub>)变化研究现状

### 1.1.1 大气臭氧变化的国外研究现状

目前,全球大气臭氧的变化引起了全世界的关注,已成为当代大气科学与环境科学领域的前沿研究课题之一,在全球变化研究中占有重要的地位。

自从 1839 年德国科学家 C. F. Schonbein 首次发现臭氧以来,大气臭氧问题的研究已经经历了 160 多年的历程。1876 年人们开始用化学的方法定量地测量空气中的臭氧含量并连续进行了 31 年;1880—1881 年发现了可见光谱区和紫外线光谱区的臭氧吸收带;1924 年 Dobson-UV-分光光度计开始用于测量臭氧总量;1926 年首先在欧洲建立了 6 个臭氧总量观测站;1929 年在巴黎召开了第一次国际臭氧会议;1934 年采用“逆转法”计算了大气臭氧垂直分布;同年首次实现了对大气臭氧层垂直分布的直接测量,计算与实测结果表明,臭氧层的最大浓度位于 22 km 高度上;1936 年在 Oxford 举行了第二次国际臭氧会议。在这以后的一段时间里,由于二次大战的影响,臭氧问题的研究进展十分缓慢。1957—1958 国际地球物理年(IGY)促使臭氧的研究工作飞速发展,建立了世界臭氧观测台站网;采用了新型 Dobson 分光光度计和臭氧探空仪,1960 年研制出的 Brewer-Mast 电化学臭氧探空仪,被认为是直接测量臭氧垂直分布的标准型仪器,一直沿用至今;1967 年开始用紫外线后向散射法(BUV)在轨道地球物理观测(OGO4)卫星上连续两年测量大气臭氧分布,从而获得了臭氧的全球分布资料。从 1974 年开始的世界范围的大气臭氧总量的系统观测进一步确认,臭氧含量有明显的地区和季节变化,其范围约为 200~450 DU。同时,发现近几十年来臭氧含量发生了变化,其中对流层臭氧增加,而平流层臭氧含量却逐年减小,臭氧总量日趋下降。自南极上空出现臭氧洞以来,世界各国十分关注大气臭氧层的状况。1987 年 9 月美国同其他 23 个国家及欧共体在蒙特利尔首次召开会议,产生了限制氟利昂和含溴卤代物排放条约,时隔不久,许多发达国家在条约上签字支持这一举动;1988 年,WMO/NASA 国际臭氧趋势工作组呼吁对臭氧进行一次完整的重新评估,并得到 WMO 执行委员会的签署,并且每四年开展一次国际范围的臭氧评估会议;1989 年在伦敦召开的拯救臭氧层世界大会,强调各国必须采取实际措施制止对臭氧层的破坏,其目的是为了保护人类及其生存环境免遭过量紫外辐射(UV)的伤害;而 1991 年 9 月在华盛顿举行的第一次国际 Dobson 臭氧资料工作会议,参会人员认为现有资料不足,有必要得到修正的、更准确的资料用于气候趋势分析以及卫星资料比对(张中波等, 2005)。

在这一期间,Donald(1988)研究了北半球 O<sub>3</sub> 总量的长期变化,结果表明,20 世纪 60 年代初期 O<sub>3</sub> 总量达到最低值,随后开始回升,到 70 年代初 O<sub>3</sub> 总量达最大值,80 年代以来又呈下降趋势。Stolarski 等(1991)利用 1978—1990 年 TOMS 资料,运用统计模式,计算出全球各纬度平均臭氧的年变化趋势,发现趋势随纬度而变,赤道附近近似为零,向两极逐渐增加,臭氧减少主要在极地冬春季节。Randel 等(1995)分析 1991—1994 年全球臭氧变化时发现这 4 年变化最大的区域是每年冬春季节北半球中纬度地区,特别是在 1992—1993 年期间,超过了 1993 年春季的南半球高纬度地区。1996 年 McPeters 等(1996)通过与 Dobson 观测网的比较,对 Nimbus 7 星载 TOMS 版本 7 臭氧 14.5 年资料的精度进行了评估。在 1998 年与 2002 年,Bojkov 等(1995)和 Fioletov 等(1997, 2002)通过对地面资料与卫星资料进行比较,分析了世

界地基臭氧观测网可能存在的问题。

世界气象组织和联合国环境署(WMO/UNEP)(2002)从1981年起,大约每4年出版一个有关大气臭氧问题的评估公报。2002年的评估公报指出,在1997—2001年期间,全球平均臭氧总量比1964—1980年全球平均臭氧量减少了3%;1992—1993年间达到了自全球系统性臭氧观测以来的最低值,比1980年以前所有年份平均值低5%;在热带地区(25°N~25°S),臭氧总量没有明显的趋势变化,而在南北半球(25°~35°)地区臭氧总量趋势变化比较明显。2007年最新公布的评估报告(WMO, 2007)指出,在未来数十年内,两极地区的臭氧消耗量仍将很高、变化也很大;南极上空的臭氧空洞存在期亦将比先前所估算的时间更久。两极地区春季时期的臭氧严重消耗情况将不断延续到冬季,因为两极地区的平流层十分寒冷,而且两极地区每年出现的各种气候变化亦可在臭氧消耗程度方面发挥较大的作用。未来20年内,预计南极上空的臭氧空洞将不会发生重大改善。新近做出的估算结果表明,如果各方能够继续遵守《议定书》的现行控制措施,则南极上空的空洞将于2060—2075年间恢复到先前的水平——这要比在上一次评估报告中所作估算的恢复时期晚10~25年。之所以预测将会出现延迟,主要是由于研究人员更好地把握了臭氧消耗气体在两极地区的发展演变情况。根据各种化学—气候模式取得的结果,预计北极地区的臭氧水平平均将于2050年之前恢复到1980年代之前的水平(这一数值通常被用作衡量臭氧层恢复的基准数值),然而这些预测并非十分确定。未来数十年内,南极或北极地区在个别年份中仍会出现非正常的、较高或较低的臭氧消耗程度,诸如2002年间出现的南极臭氧空洞较小,而2006年南极则出现了有记录以来最严重的一次臭氧空洞的情况等。当消耗物质含量基本保持不变的情况下,预计这一时期内将会出现这些各不相同的变化。

### 1.1.2 大气臭氧变化的国内研究现状

中国科学家对大气臭氧的研究做出了重要的贡献,早在20世纪30年代,严济慈等就测量了中心在2553 nm的哈特利带的吸收系数,一直被广泛引用。在50年代末期,我国开始了臭氧层的研究,60年代初在北京正式建站观测大气臭氧。从60年代初到80年代,开展了大气臭氧垂直分布的地面遥测的理论和方法的研究,魏鼎文(1964)提出了测量大气臭氧垂直分布的逆转法(C)方法,并研究了北半球臭氧的长期演变趋势(魏鼎文, 1989)。到1979年前后,北京(香河)和昆明又建站观测,这两站同时成为WMO全球臭氧观测系统(GO<sub>3</sub>OS)的正式成员。这两站中使用的Dobson臭氧仪在安装前均送往加拿大进行了标定和电子改造,并与区域标准仪Dobson 77号(日本)做了比对。而长期以来,中科院大气物理研究所Dobson观测组非常重视中国两个臭氧观测站的观测质量,因此观测数据是非常可靠的,提供了系统完整的大气臭氧观测资料。从80年代起,我国科学家又先后在兰州、北京、黑龙江五常龙凤山、浙江临安、山东青岛以及青海瓦里关等地区,进行了臭氧的观测分析研究。同时我国的大气臭氧工作在国内发展的同时,在南极中山站也开展了持续的地基臭氧总量、紫外辐射测量和臭氧探空测量,对南极臭氧洞的结构取得了实际资料。

通过观测、判读卫星资料或计算等方法,人们进一步了解了臭氧的时空分布规律、成因、未来变化趋势和对地球大气及人类的影响。郭世昌、王卫国等(1988, 1994)采用卫星和地面观测资料分析了北半球臭氧变化的趋势及原因;魏鼎文等(1989)采用1979—1993年的地面观测资料,认为北京及昆明两地臭氧总量在不断减少,尤其是在1991—1993年;周秀骥等(1995)

利用 1979—1991 年的 TOMS 卫星资料,发现整个中国臭氧总量都在不断减少,其平均年递减率随纬度增高而增大,每年的 6—10 月,在青藏高原上空形成一个臭氧总量低值区,首次揭示出了中低纬地区臭氧减少的事实。这是我国臭氧研究的一个极为重要的发现,其成因以及区域环境和气候效应是一个重要的研究方向。同时,石广玉等(1986, 1996a, 1998)采用放探空气球的方式研究我国臭氧的垂直分布规律及青藏高原臭氧低值的原因,石广玉等(1996b)、任传森等(1997a, 1997b)还分别采用大气化学模式估算了未来大气臭氧总量的变化趋势,取得了许多有意义的结果。此外,陈洪滨等(1995)对我国分南、中、北三个区域的平流层臭氧的季节变化和垂直分布进行了研究;管成功等(2006)利用 TOMS 卫星资料,以北京、敦煌和丹东三个站点为代表,分析了中国 40°N 附近大气臭氧的变化特征。史久恩等(1996)对中国南部地区大气臭氧总量进行了研究,发现中国南部地区臭氧变化存在显著的准两年振荡。对于长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征的探空观测研究表明,臭氧浓度垂直分布与湿球位温、风场有密切的关系。臭氧浓度在 2 km 以下变化幅度很大,明显的东风分量伴随臭氧增高,而 5 km 以下臭氧垂直分布可以分为峰值型、均匀型、分层结构型、低空污染型和线性增长型 5 个基本类型(郑向东, 2004)。杨景梅等(2005)基于标准 Umkehr 反演算法,利用北京地区 Dobson 仪器逆转观测资料,反演计算了北京地区臭氧的垂直分布。发现 1990—2002 年期间,臭氧总量的变化呈现出缓慢下降的趋势,但不同高度臭氧含量的变化趋势有所不同。我们将我国划分为 7 个区域,利用卫星观测的 TOMS 和 SBUV 资料对这 7 个区域上空的臭氧总量多年(1979—2003 年)的纬向偏差分布、年际变化、周期分布等特征进行了分析。结果表明,东部地区的臭氧总量常年大于西部地区的臭氧总量,青藏高原、西北高原与东部同纬度地区相比,在夏季差别最大,冬季最小。四川盆地上空的臭氧总量常年比周围地区要高。同时研究还表明了每个区域都存在准 2 a, 4~5 a 和 8~10 a 的周期振荡。同时,鉴于目前使用的 TOMS 大气臭氧资料大多为 V7 版本和 V8 版本,为了更好地利用 TOMS 资料,管成功等(2007)对两个版本在空间分布上的差异做了比较分析。此外,国内部分学者也利用了紫外差分吸收激光雷达研究了大气臭氧的分布特征(葛战旗等, 2007),根据 Brewer 和 TOMS 卫星资料联合分析和验证大气臭氧总量变化特征的研究(张中波等, 2006)。

目前,臭氧问题已成为非常活跃、在科学上占有牢固地位的研究课题,是大气化学、大气物理学、大气动力学、气候学、航天航空学、生物学、农学、环境科学关注的研究课题;而全球大气臭氧的变化则引起了全世界的关注,成为当代大气科学与环境科学的前沿课题,在全球变化研究中占有重要地位。

### 1.1.3 臭氧变化对农作物影响研究

地面  $O_3$  浓度升高会使植物叶片出现褐斑和坏疽等伤害症状、降低作物叶面积、加速叶片老化,(白月明等, 2000; 郑启伟等, 2006),增大叶片细胞膜的透性(Kangasjar *et al*, 1994; 郑启伟等, 2005),抑制植株生长(Grulke *et al*, 2007),降低作物生物量与产量(Supriya *et al*, 2005; 白月明, 2004; Nali *et al*, 2002),增加气孔阻力(Franziska *et al*, 2007; Pleijel *et al*, 2006),影响光合色素、降低光合作用(Calatayud *et al*, 2003; Vandermeiren *et al*, 2005),影响自由基和各种生物酶活性(Kangasjarvi *et al*, 1994; Zhao, 2005),同时影响作物品质(Pleijel, 1999),还会对作物的物候产生影响(Soja *et al*, 2000)。此外,地面  $O_3$  浓度升高还会对农田的地下生态系统造成影响(Hofstra *et al*, 1981),如降低微生物量碳和多样性指数(陈展等, 2007)、改变植物根

系分泌物的形成或组成(McCrady *et al*, 2000),影响菌根的侵染水平(Stroo *et al*, 1988)、抑制土壤酶的活性(Reddy *et al*, 1995)。

国外在地面 O<sub>3</sub> 增强对农业的影响的研究上起步早,涉及物种广,自动控制水平高,并从个体尺度向分子尺度和生态系统发展,从单一因子研究向复合因子研究发展,从大田试验研究向不同空间尺度上的数值模拟研究发展,从 OTC 法向 OTC 与 FACE(Leadley *et al*, 1997)相结合的方向发展。在臭氧单因素对农业影响的数值模拟方面研究较多,并达到了较高的水平(Goumenaki *et al*, 2007; Nussbaum *et al*, 2003)。国内仅王春乙等(1995)根据美国 NCLAN 提供的方法评价了对流层 O<sub>3</sub> 变化对我国农业的可能影响。国外用于试验植物种类较多,除了小麦、水稻、玉米等主要农作物,还包括了苹果(Manning *et al*, 2004)、牧草(Nussbaum *et al*, 2000)、园艺莴苣(Goumenaki *et al*, 2007)等众多的植物,国内用于试验的物种则较少。

迄今为止,还没有实验发现臭氧总量减少对农作物产生直接影响,但臭氧总量减少引起 UV-B 增加对农作物会产生显著地影响。同时, O<sub>3</sub> 的减少亦会引起地表气温的下降。石广玉的计算结果表明,当平流层 O<sub>3</sub> 浓度减少 10%~20% 或 25%~50% 时,地面温度下降百分之几度,但当 O<sub>3</sub> 浓度减少 21%~23% 时,地面温度却稍有提高。地面温度升高或减少,都会对我国农作物产生较大影响。同时,由于大气中臭氧含量的减少,会改变大气中现有气体成分的比例,进而影响到太阳辐射在大气中的传输过程,从而很有可能导致降水的变化等一系列的气象条件的变化,这些都会对农业生产产生潜在的影响。

## 1.2 UV-B 辐射对农作物影响的研究进展

自从 20 多年前第一篇报道平流层 O<sub>3</sub> 可能减少以来,紫外辐射增强对高等植物的影响就成为重要的研究课题之一,国外自 20 世纪 70 年代初就开始研究 UV-B 辐射增强对植物的影响,已取得了许多研究成果。本节分别综述了近年来国内外开展的 UV-B 辐射对农作物生长发育、生理、品质和产量的影响的研究成果。

### 1.2.1 UV-B 辐射对作物生长发育的影响研究

#### 1.2.1.1 对作物株高的影响

UV-B 辐射增强能导致作物植株矮化,改变大豆、小麦、棉花和玉米等农作物的植株高度和叶面积等形态学指标,并且作物矮化的程度随 UV-B 辐射强度的增强而增大,其中,大豆、棉花、小麦植株比对照最大下降分别为 34%、35% 和 10% 左右,玉米株高的生长速度受 UV-B 辐射的影响也比较明显。同时,作物矮化程度随作物种类、品种、作物所处的生长阶段不同而有所区别,通常, C3 植物对 UV-B 辐射比 C4 作物更为敏感,品种之间存在显著差异, UV-B 辐射对大豆(宁镇一号)的影响大于对大豆(宁镇二号)的影响;对大豆的影响在 UV-B 辐射处理后 20~30 d 才显现出来。UV-B 辐射增强使小麦植株显著降低的原因不是因为节间个数减少,而是节长缩短造成的(王传海等, 2000b)。陈建军等(2004)在 UV-B 辐射增强对 20 个大豆品种生长与生物量分配的影响研究中,同样发现有 18 个品种的大豆节长有不同程度的降低。同时,王传海等(2003a)对小麦的研究指出,小麦这种节间缩短主要表现在同株的不同节间, UV-B 辐射增强条件下小麦穗下第 1, 2, 3, 4, 5 位节间缩短的百分率分别为 3%, 13%, 14%, 28% 和 41%, 且每节缩短的程度差异很大,越往下节间缩短程度越大。由于植物高度与叶片

和叶鞘长短有关,因此在禾谷类作物中,矮化亦可由叶片和叶鞘变短所致。Barnes 等(1990)研究 12 种单子叶和双子叶作物发现 UV-B 辐射增强而改变植株高度和叶面积等形态学指标,单子叶植物更为敏感,但茎的干物重变化不大。他们认为这是由于 UV-B 辐射直接改变体内激素代谢水平所致。Tevini(1989)指出 IAA 能吸收 UV-B 并被转化为不同的光氧化产物,并包含有 3-甲基-2-羟基吲哚。当其外源供给植株时,能抑制下胚轴的生长,可见紫外辐射并非通过代谢上的限制或破坏顶端分生组织而实现其在形态学上的作用,而是植株组织对紫外辐射的一种正常的光形态反应。在这方面,还有人的植物器官的不匀称生长、根冠比的改变、顶端优势的解除以及花粉形成受阻等也作过探讨。另外,研究还表明紫外线对株高的影响与其他环境因子有关,如大豆在水分亏缺时,株高比对照只下降了 18.8%。

水稻对 UV-B 辐射的响应存在不同的情况。Biggs 和 Kossuth(1978)认为水稻植株的高度不会受 UV-B 所影响,但 Basiouny(1978)却报道过比较矮的变种。

### 1.2.1.2 对叶的影响

叶片是对环境胁迫最敏感的植物器官,因此,叶片往往能直接反映外界环境胁迫对植物产生的影响。研究表明,UV-B 辐射增强对作物的叶面积、叶龄与叶形、组织结构以及叶的器官都会产生显著的影响。

#### (1)对叶面积的影响

叶面积的大小往往与产量密切相关,因此,UV-B 辐射增强对叶面积的影响普遍为研究者所关注。Biggs 等(1978)用 70 多种作物在生长箱内进行研究,发现在 UV-B 辐射增强条件下,叶面积显著减少,减少量达 60%以上。紫外辐射增强对多种作物在大田进行研究,发现作物的叶面积显著减少,大豆(宁镇 3 号)减少量达 48%以上,棉花、小麦、玉米分别减少 30%,8%和 13%,致小麦群体 LAI 下降不是因为单位面积穗数下降,而是由于单茎叶面积下降造成的,而单茎叶面积下降又归因于叶片长度缩短和单茎叶面积减少。但是 UV-B 增强对水稻和其他谷类作物叶面积作用不大。在田间条件下,水稻叶伸展在中等 UV-B 辐射下能够大幅度增加。此外,UV-B 辐射对叶面积的影响与其他环境因子有关。小麦在 UV-B 和低可见光(PAV)辐射的结合下,叶面积减少程度更大(Teramura *et al.*, 1980)。大豆在灌溉条件下,经过 UV-B 辐射处理的叶面积显著降低,而在干旱条件下减少不明显(Murali *et al.*, 1986)。

#### (2)对叶龄与叶形的影响

研究表明,UV-B 辐射增强条件下,小麦的绿叶数显著减少,并抑制玉米叶片的生长,但是在观测的第 61 天以后,叶龄趋于一致,这表明 UV-B 辐射增强并不影响玉米的总叶龄。植物的叶龄和叶形以及叶位的不同对 UV-B 辐射增强的敏感性也不同。通常情况下表现为:幼叶的敏感性大于成熟叶,节位高的叶片的敏感性大于节位低的叶片,直立型叶片的敏感性大于伸展型叶片。

#### (3)对组织结构的影响

研究表明,植物受到 UV-B 辐射以后,叶肉海绵组织细胞层会增加,栅栏组织细胞层数目会增加,细胞变宽或变短(何永美, 2004),并会相应的增加叶片表皮层、木栓层及叶肉层(Kakani *et al.*, 2003),因而能够引起叶片厚度的增加。马铃薯叶片在 UV-B 辐射条件下,叶片厚度有 190~235  $\mu\text{m}$  的增加(Santos, 2004)。UV-B 辐射下,叶片表皮的蜡质层会发生变化,如 UV-B 可使大麦和大豆叶片上的蜡质增加 23%~28%(Steinmuller *et al.*, 1986),在棉花上甚至有 200%的增加(Kakani *et al.*, 2003),为了增加对 UV-B 的反射作用,蜡质层的某些化学

成分也会相应的发生改变。同时,UV-B 辐射胁迫还能够引起植物叶表皮细胞合成和积累大量的类黄酮等酚类次生代谢物,是叶表皮细胞明显增厚,叶片表皮细胞角质化程度显著增加,从而也增加了叶片的厚度(Laakso, 2000)。叶片组织结构发生改变,叶片厚度增加可补偿增强 UV-B 辐射后引起的光合色素的光降解,改善单位叶面积为基础的光合速率,是植物对 UV-B 辐射胁迫的一种自我保护和适应机制,这一变化可能起到直接保护植物叶片免受 UV-B 辐射危害、间接地改变叶片的光合功能和碳平衡的作用(Bornman, 1991),而表皮细胞中类黄酮等酚类物质的积累显著增强了叶片对 UV-B 的吸收和抵抗能力,是植物对 UV-B 辐射增强的一种适应方式。此外,UV-B 辐射胁迫还能引起功能叶细胞再现质壁分离和原生质割裂及细胞融合、植物叶被毛状物增加、叶片组织中导管数量减少、气孔器受破坏、气孔密度降低以及造成叶片畸形等(吴杏春, 2007),从而导致植物光合作用的降低。

#### (4)对叶片器官的影响

研究发现,UV-B 辐射增强同时会破坏叶绿体、类囊体等光合器官超微结构。同时,UV-B 辐射增强会导致叶表皮薄壁细胞溶解、叶绿体变小,叶绿体膜发生破裂、叶绿体基粒以及类囊体的结构受到破坏等,进而导致光色素系统受到破坏(侯扶江, 1998),叶绿体吸收光能减少,影响植物光合过程中的电子传递和光合磷酸化(周青, 2001)。此外,UV-B 辐射增强还可引起细胞膜的膜脂过氧化,直接破坏细胞膜的结构及其正常的生理功能,从而造成对细胞质膜的酶系统和叶绿体膜结构的破坏,进而引起了对叶绿体、类囊体等光合器官结构的破坏,导致植物光合作用降低(周青, 2001)。

#### 1.2.1.3 对发育的影响

研究表明,UV-B 辐射增强能推迟大豆生长发育的进程,且 UV-B 辐射强度越大,生育期的滞后效应就越明显。较高强度的 UV-B 辐射处理在出苗期至三叶期阶段就已出现其生物效应,而低强度的 UV-B 辐射处理其生物效应要到三叶期才出现。在整个生育期中,以三叶期至旁枝形成期这一阶段对 UV-B 辐射最为敏感,此后的始花和结荚期又表现出明显的减弱。

同时,UV-B 辐射除了改变某些物种的开花数目外,还改变其花期,并可能对授粉过程产生重要影响。植物的繁殖部分如花粉和胚珠通常被防护得相当好以免遭受太阳 UV-B 辐射,如其防护壁可吸收 98% 以上的入射 UV-B。此外,花粉外膜也含有吸收物质,在授粉期间提供保护。仅当花粉转移到柱头后,才可能受到 UV-B 辐射,并且露头的花粉对 UV-B 较为敏感。研究又表明了 UV-B 的照射显著影响小麦的开花过程,表现为开花推迟,每日开花数大幅度下降,可孕小花数下降,但 UV-B 增加对小麦的小花结实率影响并不显著,植物的双受精过程往往对外界环境较敏感,但 UV-B 增加对这一过程影响似乎不明显,可能因为小花有颖片及外稃、内稃的保护,所以虽然外界 UV-B 增加,但照射到柱头、子房上的 UV-B 剂量可能极低。UV-B 辐射增强可大大增大花粉的败育率,并随着 UV-B 辐射强度的增大,败育率也增大,这说明 UV-B 辐射增强可伤害花粉粒,使其活性大大下降(孙林, 2004)。

此外,UV-B 辐射增强对农作物生育的影响也表现在作物种子的发芽上。有研究发现 UV-B 辐射增强对大豆种子萌发率没有显著变化,仅使部分品种的最大萌发率降低和导致最大品种达到最大萌发率的时间延长。UV-B 增强虽对种子的萌发率影响不大,但对种子的发芽率、发芽势、发芽指数和幼苗长势都有影响。通过研究发现 UV-B 增强能够显著降低菠菜种子的发芽率和出苗率,延缓发芽进程,降低出苗速度,而且这种影响对圆叶菠菜更为显著。同时,在 UV-B 增强情况下萌发的种子,其培根明显的变短、变粗(冯虎元, 2001)。

## 1.2.2 UV-B 辐射对作物生理活动的影响

### 1.2.2.1 对光合作用及光合产物的影响

尽管对此研究的结果包括正反两个方面,但就总体来看,UV-辐射增强能使作物的净光合作用减弱。这方面的工作早在 20 世纪 30 年代就已开始,随后,有关低等植物和高等植物陆续有不少报道。

Van 等(1976)用 13 种植物进行 UV-B 照射,发现植物净光合速率对 UV-B 的反应相差甚大。按照反应的强弱,植物可分为敏感型、较敏感型和迟钝型三大类。C<sub>4</sub> 植物对 UV-B 辐射不大敏感,而 C<sub>3</sub> 植物较为敏感。Basiouny 等(1978)用油菜、燕麦、花生、大豆、高粱和玉米等为材料,发现经 UV-B 照射后,花生等 C<sub>3</sub> 植物的净光合作用显著下降,而玉米、高粱等 C<sub>4</sub> 植物的光合速率与希尔反应均无显著降低,这表明不同种质对 UV-B 辐射反应敏感程度不同。

Teramura 等(1980)研究指出,UV-B 照射大豆,能导致叶片成熟和最大光合能力提前出现,因而生长后期光合速率低,Basiouny 等(1978)发现,光合活性的减弱与希尔反应活性相对应,表明光合系统(PS)Ⅱ对 UV-B 辐射较为敏感,而 Brandle(1977)认为是由于抑制了现同化系统相联系的电子传递;又认为环式磷酸化解偶联作用和 RuBP 羧化酶活性下降以及类囊体膜的破坏等,这类常称为急性伤害或直接伤害,都使光能转化为化学能下降。但 Wright (1978)认为 UV 造成光合速率下降的原因是由于气孔阻力增大或气孔关闭所致,而 Murali (1986)的研究则表明与气孔行为无关,Mirecki(1984)用 UV 短期照射叶片抑制光合速率时,并无明显减少,这说明紫外辐射对植物的光合作用伤害并非直接伤害,这与我们研究相一致。Teramura(1980)等的试验表明,植物经 UV 照射后,其光合速率和光合产物累积下降同步进行,但是 Sullivan(1989)一些试验又显示出紫外线反而促进植物生物量的积累。Teramura 等(1991)从中国和东南亚各国选择了 16 个品种水稻进行的 UV-B 辐射模拟试验发现,其中 13 个品种的净光合速率和光合产量虽有不同程度的下降,但其他 3 个品种的生物产量却反而提高。他们认为,这种差异除与植物的地区适应性或遗传特性有关外,与试验的条件如 UV 照射时间长短、植物的生长阶段以及光合有效辐射的强度也存在关系。

UV-B 能强烈抑制大豆叶片的同化,其抑制程度随 UV-B 辐射的增加而加大(颜景义等, 1995a)。此外,从不同叶片的净光合作用发现,随着叶位升高,UV-B 辐射对光合作用的抑制作用也较大,表明幼叶对 UV 的反应比老叶敏感。同时,UV-B 辐射增强后,作物的净光合速率日变化也会受到影响。苏占胜等(2006a, 2006b)对小麦和玉米的研究发现,自然条件下人工分别增加 0.5 W/m<sup>2</sup> 和 1.0 W/m<sup>2</sup> 的 UV-B 辐射后,两者的净光合速率日变化都明显降低。研究还发现,紫外辐射增强对小麦光合作用产生的影响会因光强、气温等环境因子的差异而发生变化。虽然高可见光对紫外辐射的伤害有光修复作用,但当高光强时,UV-B 辐射强度亦加大,故对小麦光合速率抑制作用加大。在相同的温度条件下,小麦随着 UV-B 辐射强度加大,净光合速率变小,在小麦光合作用最适温度范围之内,UV-B 辐射抑制作用最为明显,气温过高或过低都会削弱 UV-B 的生理抑制作用。吴杏春等(2007)对两个不同品种的水稻的研究指出,UV-B 辐射对水稻叶绿素含量、叶绿素 a/b 的比值的降低以及对 a 荧光诱导动力学参数的改变和光合速率的抑制与 UV-B 辐射使水稻叶片气孔器受破坏,叶绿体结构变形以及基粒片层排列稀疏紊乱有一定的关系。

从影响机理上来讲,国内有学者研究普遍认为紫外辐射增强可以通过两种方式使作物

光合速率降低,一种是 UV-B 辐射直接破坏光合系统酶的活性,使光合色素分子分解的直接伤害;另一种是 UV-B 辐射通过抑制气孔传导或使气孔阻力增大,从而使二氧化碳传导率和固定率下降,后者是 UV 使大豆作物光合生产力下降的主要原因之一(李元,1998)。

### 1.2.2.2 对呼吸作用的影响

UV-B 对植物呼吸作用的影响存在着不同的结果。Brandle(1977)发现 UV-B 照射 5 h 后豌豆的呼吸作用明显提高。Caldwell(1976)发现酸膜(*Rumex patientia*)经 7 d UV-B 处理后,其暗呼吸在第二天明显增强,并认为暗呼吸的增强是导致净光合下降的原因之一。El-Mansey 实验表明 UV 不仅不提高而且降低苍耳(*Xanthium*)暗呼吸,主要原因 UV 抑制了 Cyt 氧化酶的活力。实验得到了不同甚至是矛盾的结论,这与使用的材料不同以及使用不同的测定指标有关。国内的研究表明,在 UV-B 辐射增强 20%时,在相同的气象条件和田间管理下,增强的 UV-B 辐射对呼吸速率的季节变化模式无明显的影响。在返青期和拔节孕穗期,UV-B 辐射显著降低了冬小麦系统的呼吸速率,而在抽穗一成熟期,UV-B 辐射没有显著的影响。

### 1.2.2.3 对蒸腾作用的影响

蒸腾作用是植物体内的水分以气态方式从植物的表面向外界散失的过程。蒸腾作用不仅是植物吸收和运输水分的主要动力,还是植物吸收和运输各种营养物质以及在植物体合成的有机物质转运的动力,此外,蒸腾作用对植物体还具有降温的作用。水分利用效率是指植物叶片净光合速率与蒸腾速率的比值,可以反映植物叶片光合作用过程中对水分的利用情况。

国外研究表明,UV-B 辐射增强将导致植物蒸腾作用的减弱,Tevini(1991a)等认为 UV-B 辐射抑制向日葵蒸腾作用的主要原因是 UV-B 辐射影响气孔的开闭,从而导致蒸腾速率的变化,Mirecki(1984)研究发现,在 UV-B 辐射增强条件下,大豆蒸腾作用的减少主要是通过刺激使得叶表气孔关闭而形成的。其主要原因可能是 UV-B 辐射抑制了植物细胞内液胞膜上钾-腺苷三磷酸酶( $K^+$ -ATPase)活性,促进钾离子从保卫细胞中流出,从而导致了气孔关闭(Negash *et al.*,1986)。也可能是 UV-B 辐射诱导了细胞内源激素脱落酸(ABA)的生物合成,从而对气孔行使调节作用,导致气孔关闭,使得蒸腾速率降低(An *et al.*,2002)。

UV-B 辐射增强对蒸腾作用的影响还与植物本身水分状况有关(Mirecki,1984)。在过量的 UV-B 辐射下,干旱年份大豆的蒸腾作用、气孔传导率和叶水势都无明显异常,而在水分正常的年份里,营养生长期间的蒸腾作用未受 UV-B 辐射的影响,但生殖生长期间则有明显的降低;营养生长后期和生殖生长前期,气孔传导率因 UV-B 辐射的增强而增大;生殖生长后期除气孔传导率减小外,UV-B 辐射效应不明显,表明在自然条件下,水分亏缺掩盖了 UV-B 效应。

国内的研究也同样表明了 UV-B 辐射增强会导致作物蒸腾速率下降。研究表明,用对 UV-B 敏感的水稻品种在温室中接受了 40%臭氧减少的 UV-B 照射 20 d,发现 UV-B 辐射增强可抑制水稻叶片气孔的形成和发育,从而抑制植物蒸腾等生理活动(黄少白等,1998)。同时,UV-B 辐射条件下,菜豆叶片的蒸腾速率先升高,随后迅速降低,而对于不同叶位的叶片而言,UV-B 辐射增强后,中间成年叶的蒸腾速率最低,上部幼龄叶最高,而气孔导度的差异主要表现为第 1 叶最低,成年叶最高,幼叶居中(李雪梅,2006)。此外,UV-B 辐射增强使得大豆和小麦光合速率均下降,但蒸腾速率的下降速度小于光合速率的下降速度,说明 UV-B 辐射不仅能通过影响植物的气孔行为,还很可能通过其他途径影响植物的蒸腾和光合速率。

尽管多数研究发现 UV-B 辐射增强对蒸腾作用有抑制作用,但是也有研究者发现 UV-B



辐射增强对蒸腾作用有促进作用。罗南书等(2003)研究发现,适当增加 UV-B 辐射能够打破丝瓜的光合“午休”现象,有助于丝瓜的蒸腾作用,说明了紫外辐射对作物光合作用的影响并不是总是起抑制作用的,因作物种类以及辐射强度的不同而不同。

#### 1.2.2.4 对矿质营养的影响

Murali 等(1985)报道,UV-B 辐射影响大豆吸收磷的速率与使用磷的数量有关,磷较多时,UV-B 辐射不影响磷的吸收,反之,则有影响。Ambler 等(1975)发现,未经 UV-B 补充照射处理的棉花中 Zn 从子叶运转到幼叶的速度是经 UV-B 照射处理的 2 倍,这显示 UV-B 可抑制 Zn 在植物体内的运转。Dal(1990)发现,用 UV-B 处理的水稻,叶子的电导率减小,这种抑制作用将影响水稻根系的吸收能力、植株的营养和水稻的生物产量。Wright 等(1978)用培养的烟草细胞吸收<sup>86</sup>Rb 和<sup>14</sup>C-甘露醇后再进行 UV-B 照射,结果在外渗中有大量的<sup>86</sup>Rb,但无<sup>14</sup>C-甘露醇,因而认为 UV-B 辐射可能破坏了质膜上的某些特定的离子通道,但对细胞的整个结构影响不大。Zill 和 Tolbert(1958)研究发现小麦经 UV-B 辐射处理后,根部细胞  $K^+$ -ATPase 酶活力受到抑制。李元等(2001a)对春小麦的研究发现,在 UV-B 辐射增强下,春小麦各生育期间叶和茎的 Mg, Zn 含量均显著增加,而 Mg 和 Zn 总累积均随 UV-B 辐射增加而降低, Mg 的降低速率比 Zn 大,同时土壤中总的游离态 Mg, Zn 含量有所增加。此外,UV-B 辐射增强还会导致春小麦生育期间叶和穗中 Fe 含量的增加与根和茎中 Fe 含量的减少,这说明了 UV-B 辐射刺激了 Fe 从根茎向叶穗的转运(李元等, 2000)。同时,小麦扬花期增加 UV-B 辐射能够显著增加麦叶中 Mg, Fe 和 Zn 的含量(李元等, 2001a)

#### 1.2.2.5 对衰老的影响

用 UV-B 辐射处理水稻叶片,无论在黑暗或光照下,UV-B 辐射都能加速叶绿素、水溶性蛋白质的分解和膜脂的过氧化作用,使细胞透性加大,与光照条件下的处理相比,黑暗条件下的 UV-B 衰老效应更强,表明可见光能抵消 UV-B 对植物的伤害作用,这与 Joshi 等(1991)用 UV-A 加速黑暗中小麦叶片叶绿素的降解,Behera 等和 Kramer 等(1991)进行的细胞质膜的伤害机理研究以及 Joshi 等(1991)在小麦叶片中照射 UV-B 辐射后 MDA 量明显上升的研究结果有许多类似之处,这表明光敏色素参与了 UV-B 辐射诱导的机制,且能有效地阻止生物体内紫外光受体(photoreceptor)对膜脂过氧化的破坏作用。另外 Kreamer 等(1991)对黄瓜的 2 个品种进行 UV-B 辐射处理后,发现丁二和亚胺含量明显上升,他们认为多胺能在质膜表面形成一种离子型的结合体,阻止脂质的过氧化作用。此外,像离子外渗和叶绿素内膜的破坏等研究都表明了 UV-B 是通过损伤膜系统而引起细胞衰老的。

#### 1.2.2.6 对遗传特性的影响

UV-B 辐射对作物生理的影响还在于其对作物遗传性的影响。强维亚等(2004)对 UV-B 辐射后的大豆胚轴研究发现,UV-B 辐射导致 DNA 损伤,并诱导了 DNA 损伤的修复,胚轴细胞 DNA 非按期合成(UDS)效应增强,UDS 指数增大。采用 8.22 和 12.42  $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  的两个处理,发现高强度(12.42  $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )的 UV-B 辐射加重了 DNA 损伤,而修复未被加强,并且高强度的 UV-B 辐射抑制基因的正常表达。何丽莲等(2006)在小麦品种对增强 UV-B 辐射响应的 RAPD 分析中发现 8 个小麦品种间存在着明显的遗传多态性。而这方面国外开展得较早,Bjorn 等(1996)认为 DNA 是 UV-B 辐射伤害植物的主要位点之一,其对生物大分子 DNA 的伤害可引起植物基因表达的改变。Lindhahl 等(1999)指出,UV-B 辐射诱导