

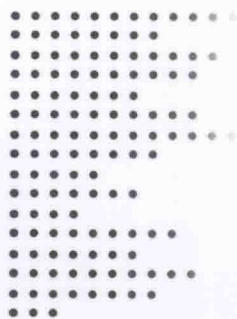
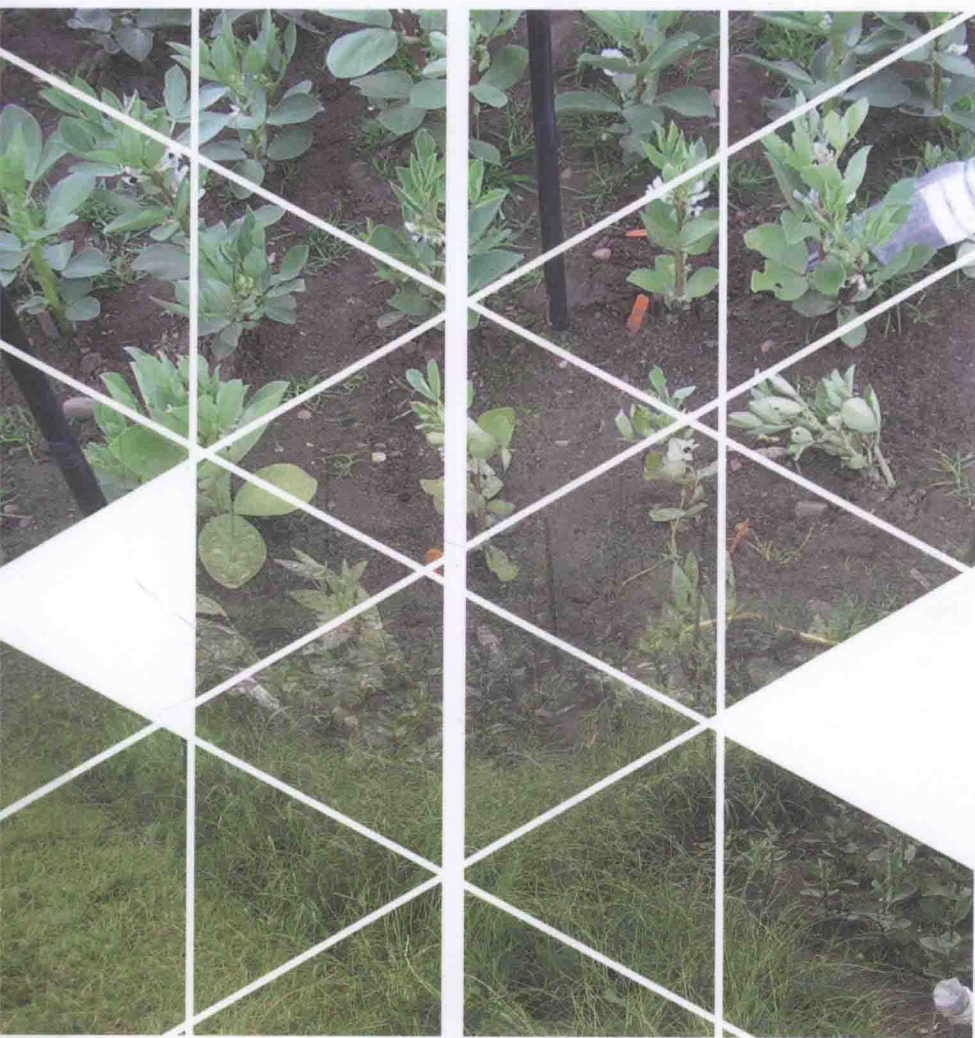


地球信息科学基础丛书

胁迫条件下的植物高光谱 遥感实验研究

—以条锈病、水浸与CO₂泄漏胁迫为例

◎ 蒋金豹 陈云浩 李京 张丽 何汝艳 乔小军 著



科学出版社

地球信息科学基础丛书

胁迫条件下的植物高光谱 遥感实验研究

——以条锈病、水浸与 CO₂ 泄漏胁迫为例

蒋金豹 陈云浩 李 京 张 丽 何汝艳 乔小军 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年来从事植被胁迫光谱特征变化研究的成果。本书主要介绍了小麦在条锈病及多种植被在 CO₂ 泄漏、水浸胁迫下的光谱特征变化及识别模型。全书共 7 章:第 1 章介绍研究背景及国内外研究现状;第 2 章介绍条锈病胁迫下小麦光谱变化特征与病情严重度反演;第 3 章介绍条锈病胁迫下小麦生理生化参数反演;第 4 章介绍水浸胁迫下多种植物单叶光谱变化分析与识别;第 5 章介绍 CO₂ 泄漏胁迫下多种植物单叶光谱变化分析与识别;第 6 章介绍 CO₂ 泄漏胁迫下植被冠层光谱特征分析与识别;第 7 章介绍模拟地下储存 CO₂ 泄漏对地表生态环境影响的控制实验方法。

本书可供从事高光谱遥感、农业信息技术、环境遥感、碳捕捉与储存方面的研究人员参考,也可作为上述研究领域的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

胁迫条件下的植物高光谱遥感实验研究:以条锈病、水浸与 CO₂ 泄漏胁迫为例/蒋金豹等著. —北京:科学出版社,2016. 5

(地球信息科学基础丛书)

ISBN 978-7-03-048319-5

I. ① 胁… II. ① 蒋… III. ① 光谱分辨率-光学遥感-应用-作物-栽培-研究 IV. ① S31-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 108928 号

责任编辑:苗李莉 朱海燕 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张:11 插页:4

字数:261 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着全球气候变暖,局地气候要素的异常变化会引发农作物病害,造成农作物减产,给我国粮食安全带来风险。而全球气候变暖,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)认为主要是温室气体(CO_2)过量排放造成的,希望把工业排放的 CO_2 进行液化后进行地下封存以减缓全球气候变暖速度。但储存在地下的 CO_2 存在发生泄漏的风险。

小麦条锈病是我国最为严重作物病害之一,一般发生区可损失产量 10%~20%,严重流行区可达 30%以上。常规的作物病害监测主要是植保人员通过田间调查,再运用经验辅助来判断,这种传统的方法耗时、费力,预报的精确度和时效性差,进而加大产量损失。随着现代农业发展,也迫切需要一种能够实时、科学、无损、快捷、大范围监测和诊断作物病害的技术手段。目前遥感技术是唯一能够在大范围、快速获取地表连续地表信息的手段,且其分辨率不断提高,为定量遥感在农业、生态环境领域的应用打下良好基础。

IPCC 于 2005 年撰写了《关于二氧化碳捕获和封存的特别报告》,随后法国、德国以及我国都先后试点碳捕捉与储存项目,但储存在地层深处的 CO_2 气体发生轻微泄漏,究竟会对地表植被生态造成什么样的影响与风险,以及如何在储存区探测到微泄漏点,都是一个值得研究的问题。

考虑到地表植被在外界因素胁迫作用下其生长发育状态、生理生化参数都会受到影响,进而导致植被的光谱特征发生变化。随着近年高光谱遥感技术的快速发展,在农业、生态环境监测等领域得到广泛应用。

本书侧重于研究小麦在条锈病、多种植被在 CO_2 轻微泄漏及水浸胁迫下的光谱变化特征,为将来利用高光谱遥感技术识别胁迫作用下的植被提供了理论依据与技术方法。书中主要反映了近几年项目组科研成果,主要包括:国家科技支撑项目“旱区多遥感平台农田信息精准获取技术集成与服务”(2012BAHB04),国家自然科学基金“地下封存 CO_2 泄漏对地表植被影响的光谱响应实验研究”(41101397),“地下储存天然气微泄漏地表植被胁迫与适应特征的高光谱探测实验研究”(41571412),教育部博士点基金项目“地下储存的 CO_2 气体泄漏对地表植物的影响及其光谱响应规律模拟研究”(20100023120007),中央高校基本科研业务费专项资金项目“利用高光谱遥感监测废弃煤炭矿井封存温室气体泄漏点的关键技术研究”(2009QD13),国防科工委军民转民用项目“作物病害高光谱遥感监测研究”(JZ20050001—06)。本书是著者研究团队与多家科研、教学单位通力合作取得的成果,同时也反映了培养的硕士、博士的部分研究成果。

本书共有 7 章。第 1 章是绪论,主要介绍研究的背景及国内外研究现状;第 2 章是条锈病胁迫下小麦光谱变化特征与病情严重度反演,主要介绍如何利用光谱变化特征识别条锈病胁迫下的小麦以及其严重度定量反演方法;第 3 章是条锈病胁迫下小麦生理生化参数反演,主要介绍用不同方法定量反演小麦的生理生化参数;第 4 章是水浸胁迫下多种植物单叶光谱变化分析与识别,分析了 5 种植被在水浸胁迫下的光谱特征与识别方法;第

5 章是 CO₂ 泄漏胁迫下多种植物单叶光谱变化分析与识别,重点阐述了 5 种植被在 CO₂ 泄漏胁迫下的光谱特征与识别方法;第 6 章是 CO₂ 泄漏胁迫下植被冠层光谱特征分析与识别;第 7 章是模拟地下储存 CO₂ 泄漏对地表生态环境影响的控制实验方法,介绍模拟实验设计的原理与方法。

在本书成果开展实验与研究过程中,诚挚感谢英国合作导师诺丁汉大学地理学院 Michael D Steven 教授悉心指导与帮助,其提供了良好的实验条件,让我顺利完成了 CO₂ 轻微泄漏与水浸胁迫实验;中国科学院遥感与数字地球研究所黄文江研究员指导我参与小麦条锈病胁迫实验。衷心感谢南京大学杜培军教授,北京师范大学刘素红教授、唐宏教授、宫阿都副教授和蒋卫国副教授,首都师范大学赵文吉教授,中国矿业大学(北京)杨可明教授等给予悉心指导并在撰写过程中提出了很多宝贵意见;感谢英国诺丁汉大学蔡一翔博士、程园园博士、张莉博士,以及大连理工大学宣亚蕾博士,北京师范大学王圆圆博士、余晓敏与邱全毅硕士,中国矿业大学(北京)卫黎光、蔡庆空、张玲、郭海强、李一凡、赵汝冰、陈绪慧、郭会敏、尤笛、鲁军景、赵可、李梦梦等同学在实验及数据处理分析过程中给予的帮助!

随着高光谱遥感技术的发展,在农作物病害,以及生态环境监测方面应用逐渐走向成熟,希望本书能够为农作物病害监测、地下气体微泄漏监测、植被胁迫监测提供参考,促进高光谱遥感技术的应用。由于著者水平有限,书中内容和观点可能存在不妥之处,恳请读者不吝赐教。

蒋金豹
2016 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 高光谱遥感的概念	4
1.3 国内外研究现状	4
第 2 章 条锈病胁迫下小麦光谱变化特征与病情严重度反演	11
2.1 小麦条锈病胁迫实验设计	11
2.2 数据处理方法	13
2.3 利用高光谱指数识别小麦条锈病	15
2.4 利用高光谱指数与回归分析方法反演小麦条锈病严重度	19
2.5 利用主成分分析方法定量反演小麦条锈病严重度	22
2.6 利用 REP 与 YEP 反演小麦条锈病严重度	26
2.7 大豆在不同病害胁迫下其光谱特征及识别研究	31
第 3 章 条锈病胁迫下小麦生理生化参数反演	36
3.1 条锈病胁迫下小麦生理生化参数测量	36
3.2 条锈病胁迫下小麦叶绿素浓度高光谱遥感估测	37
3.3 条锈病胁迫下小麦叶片氮素含量高光谱遥感估测	42
3.4 条锈病胁迫下冬小麦冠层叶片全氮含量小波法估测	46
3.5 条锈病胁迫下小麦冠层叶绿素密度高光谱遥感估测	51
3.6 条锈病胁迫下冬小麦叶绿素密度投影寻踪降维方法估测	55
3.7 条锈病胁迫下小麦相对含水量高光谱遥感估测	58
3.8 利用红外归一化指数反演条锈病胁迫下的小麦叶面积指数	63
第 4 章 水浸胁迫下多种植物单叶光谱变化分析与识别	69
4.1 水浸胁迫实验设计与数据采集	69
4.2 数据处理以及分析方法	70
4.3 选择识别水浸胁迫下植物的单叶光谱与微分指数	72
4.4 不同植被在水浸胁迫下光谱变化及识别结果	73
第 5 章 CO ₂ 泄漏胁迫下多种植物单叶光谱变化分析与识别	98
5.1 CO ₂ 泄漏实验设计与数据采集	98
5.2 数据处理及分析方法	100
5.3 实验区内 CO ₂ 空间分布情况	100
5.4 数据选择与奇异值处理方法	101
5.5 选择识别 CO ₂ 胁迫下植物的单叶光谱与微分指数	101

5.6	不同植被在 CO ₂ 胁迫下光谱变化及识别结果	101
5.7	大豆在 CO ₂ 泄漏胁迫下的症状与单叶光谱特征	123
第 6 章	CO₂ 泄漏胁迫下植被冠层光谱特征分析与识别	129
6.1	实验设计与数据采集	129
6.2	冠层光谱数据预处理方法	130
6.3	利用冠层光谱指数识别 CO ₂ 泄漏胁迫下的草地与大豆	130
6.4	连续小波变换分析方法识别 CO ₂ 泄漏胁迫下的草地	135
6.5	波段深度与吸收宽度识别 CO ₂ 泄漏胁迫下草地与大豆	139
6.6	利用单叶与冠层微分光谱识别 CO ₂ 泄漏胁迫大豆	144
第 7 章	模拟地下储存 CO₂ 泄漏对地表生态环境影响的控制实验方法	153
7.1	实验方案设计原理	153
7.2	实验方案设计	154
7.3	利用空间差分技术绘制土壤中 CO ₂ 浓度分布图	158
参考文献		160
彩图		

第1章 绪 论

1.1 研究背景

植被遭受营养(冯伟等,2008b;唐延林等,2004)、水分(赵春江等,2002)、病害(黄木易等,2003;蒋金豹等,2007a;刘良云等,2004;Zhang et al.,2005)、水浸(蒋金豹,2009)、土壤重金属污染(关丽和刘湘南,2009;童庆禧等,2006a;杨璐等,2008)等因素胁迫时,其光谱特征都会发生变化。熟悉并掌握植物在胁迫作用下光谱变化特征,为将来利用高光谱遥感进行监测与识别提供理论依据与技术。本书胁迫因素选择小麦条锈病、水浸与CO₂ 泄漏,主要原因如下。

(1) 小麦条锈病是我国最为严重作物病害之一,有必要研究小麦在条锈病胁迫下光谱及生理生化参数的变化规律。

粮食安全是维护我们国家安全的重要基础,目前从中央到地方政府都很重视粮食生产,不断增加资金、科技等投入,以提高粮食产量。国家最近几年采取多项措施,设法提高农民的收入,调动农民的种粮积极性。但受到气候变化、环境因素的影响,严重制约着粮食产量的增加。我国幅员辽阔,每年总是有不同地方遭受水灾、旱灾、雪灾,以及病虫害的影响,致使农作物产量降低,其中,作物病害是影响农业作物高产、稳产的重要因素之一,也是农业减灾重点研究的领域之一。

小麦条锈病是我国最为严重作物病害之一(李光博等,1989),根据农业部(2006)统计,我国小麦条锈病常年发生面积 6000 万~8000 万亩(1 亩 $\approx$ 666.7m²),一般发生区可损失产量 10%~20%,严重流行区可达 30%以上。我国小麦条锈病曾在 1950 年、1964 年与 1990 年大流行,分别致使小麦减产 60 亿 kg、32 亿 kg 和 25 亿 kg(万安民,2000)。2002 年小麦条锈病又在全国范围严重发生,发病面积达 333 万 hm²,给小麦生产带来了巨大损失(黄木易等,2003)。因此如何提前预测该病的发生发展,控制其流行,受到各级政府和人民群众的高度重视。

常规的作物病害监测主要是通过植保人员田间调查,再运用经验辅助来判断,这种传统的方法耗时、费力,预报的精确度和时效性差,进而增加产量损失。随着现代农业发展,迫切需要一种能够实时、科学、无损、快捷、大面积地监测和诊断作物病害。随着空间遥感技术,尤其是传感器技术和高光谱遥感技术的快速进步,高光谱遥感图像的分辨率不断提高,为定量遥感在农业、生态环境领域的应用打下良好基础。国内外学者利用高光谱技术对作物长势监测、营养诊断和生物物理参数(叶面积指数、生物量)和生物化学参数(叶片氮素、叶绿素、水分)的遥感反演方面进行了大量细致而深入的研究(Hansen and Schjoerring,2003;Jackson and Ezra,1985;Nguyen and Lee,2006;Peñuelas et al.,1993b,1994;Seelig et al.,2008;Shibayama and Akiyama,1989;Stone et al.,1996;Strachan et al.,

2002; Yoder and Pettigrew-Crosby, 1995; 冯伟等, 2008a, b, c; 吉海彦等, 2007; 李凤秀等, 2008; 李映雪等, 2003; 刘占宇等, 2008; 孟卓强等, 2007; 宋开山等, 2007; 田永超等, 2004; 王纪华等, 2000; 王秀珍等, 2004; 薛利红等, 2008; 杨晓华等, 2008), 已经获得一些有益的成果, 对作物病害监测也进行了初步研究(Zhang et al., 2003; 黄木易等, 2003; 蒋金豹等, 2007c, d; 刘良云等, 2004)。鉴于以上基础, 使利用高光谱遥感监测作物病害成为可能。

(2) 全球气候变化加剧, 碳捕捉与储存技术研究逐渐兴起, 有必要研究地下封存 CO₂ 微泄漏对地表植被的胁迫影响及光谱特征变化规律。

随着全球气候变化加剧, 世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)于1988年联合建立了政府间气候变化专门委员会(IPCC), 其主要职责是评估有关气候变化问题的科学信息, 以及评价气候变化的环境和社会经济后果, 并制定现实的应对策略。IPCC于2007年发布第四次研究报告, 报告指出:“全球气候系统的变暖是‘明确无疑’的, 日益增加的全球大气和海洋温度、正在升高的全球海平面, 以及冰雪的减少都证实了这一点”。

根据全球地表温度的器测资料(自1850年以来), 1995~2006年这12年中, 有11年位列最暖的12个年份之中。自1961年以来, 全球平均海平面每年平均上升1.8mm, 而从1993年以来平均每年上升3.1mm, 热膨胀、冰川、冰帽和极地冰盖的融化为海平面上升作出了贡献。从1978年以来的卫星资料显示, 北极年平均海冰面积已经以每十年2.7%的速率退缩, 夏季的海冰退缩率较大, 为每十年7.4%。南北半球的山地冰川和积雪平均面积已呈现退缩趋势(IPCC, 2007)。

气候变化的主要原因在于大气中温室气体排放量增大(图1-1)。自工业化时代以

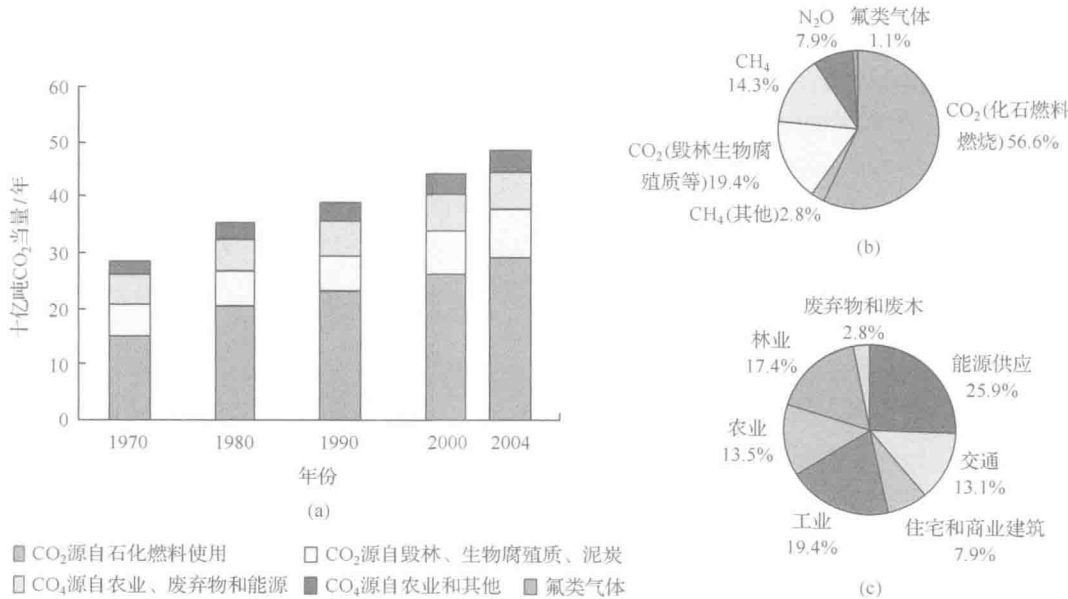


图 1-1 全球人为温室气体排放量(IPCC, 2007)

(a) 1970~2004 年全球人为温室气体年排放量; (b) 按 CO₂ 当量计算的不同温室气体占 2004 年总排放的份额;

(c) 按 CO₂ 当量计算的不同行业排放量占 2004 年总人为温室气体排放的份额 (林业包括毁林)

来,由于人类活动已引起全球温室气体排放增加,其中在 1970~2004 年增加了 70%。二氧化碳(CO₂)是最重要的人为温室气体。在 1970~2004 年,CO₂ 的排放增加了大约 80%。2000 年之后,能源供应的单位 CO₂ 排放量的长期下降趋势出现了逆转。自 1750 年以来,由于人类活动,全球大气 CO₂、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)浓度已明显增加,目前已经远远超出了根据冰心记录测定的工业化前几千年中的浓度值。2005 年大气中 CO₂(379ppm^①)和 CH₄(1774ppb^②)的浓度远远超过了过去 650000 年的自然变化的范围。全球 CO₂ 浓度增加的主要原因是化石燃料的大规模使用(IPCC,2007)。

如何减缓气候变化,最有效的措施就是减少温室气体的排放,正如报告指出的那样,在能源供应、交通、建筑、工业、农业、林业、废弃物等领域,通过采取改进能源供应和分配效率,使用更多高燃油效率汽车和混合动力汽车,削减建筑能耗、提高能效,改进耕作和土地管理以增加其碳储存能力、造林和恢复植被,以及受控的废水处理等具体措施,可以实现减缓气候变化。但随着人类生活水平的提高,人类排放的温室气体越来越多,为了有效解决这一问题,一些专家学者提出把 CO₂ 进行地质封存的建议。IPCC 受第七次缔约方大会的邀请,于 2005 年撰写了《关于二氧化碳捕获和封存的特别报告》,涵盖 CO₂ 源、CO₂ 的捕获、运输和采用地质方式封存、海洋封存、矿石碳化或在工业生产过程中对 CO₂ 加以利用的技术特点。地质封存方案见图 1-2(IPCC,2005)。

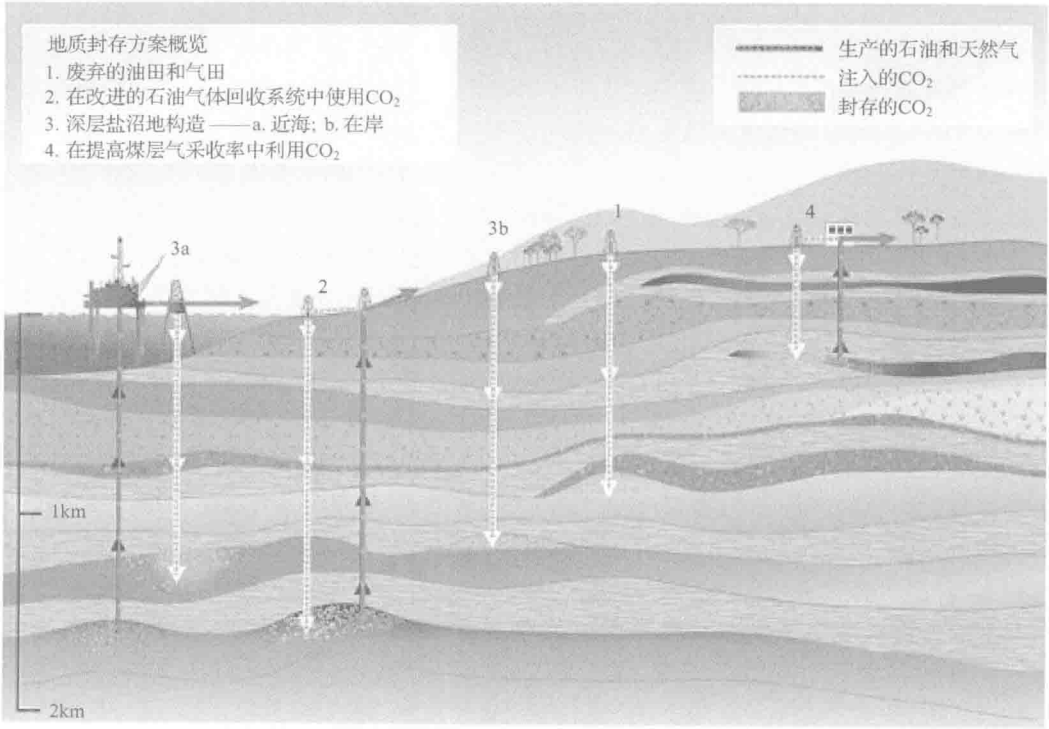


图 1-2 CO₂ 地质封存方案概览

① 百万分之一
 ② 10 亿分之一

当把 CO_2 捕获液化后进行地质封存,把 CO_2 封存在地下,就有泄漏的风险,一旦 CO_2 泄漏究竟怎样监测判断,本书后半部分的研究重点就在于此——能否利用高光谱遥感监测出 CO_2 的泄漏点。

(3) 洪涝灾害是造成我国损失最严重的一种自然灾害,有必要研究水浸胁迫对地表植被的影响及光谱特征变化规律。

在中国,洪涝灾害是造成损失最严重的一种自然灾害。随着全球气候变化,我国洪涝灾害发生的频率与影响范围都呈不断增加的趋势(胡田田和康绍忠,2005)。据统计,1950~2008 年全国年均受灾面积达 $9.7 \times 10^4 \text{km}^2$ 以上(陈莹等,2011)。同时水浸也可以使土壤中的氧气含量降低,而 CO_2 轻微泄漏也会导致土壤中氧气含量降低。土壤中氧气含量降低将会阻碍植被根部呼吸,抑制其根部养分合成,从而影响地表植被生长发育。选择水浸胁迫因素,一方面可以研究涝渍胁迫下地表植被的光谱变化,为以后利用高光谱遥感监测洪涝灾害提供依据;另一方面水浸与 CO_2 泄漏一样,都可以导致土壤缺氧,但缺氧的机理却不一样,可为 CO_2 泄漏胁迫实验作对比实验,研究对比其与 CO_2 泄漏胁迫导致的植被光谱特征有何异同点。

1.2 高光谱遥感的概念

高光谱为高光谱分辨率遥感的简称。目前遥感界公认当光谱分辨率在 $1/10$ 波长的遥感称为多光谱遥感,光谱分辨率在 $1/100$ 波长的遥感信息称之为高光谱遥感,而光谱分辨率在 $1/1000$ 波长的遥感信息称之为超光谱遥感(陈述彭等,1998)。

20 世纪 80 年代兴起的新型对地观测技术——高光谱遥感,其基础是测谱学,早在 20 世纪初测谱学就被利用于识别分子和原子的结构。当电磁波入射到物质表面时,物质内部的电子跃迁,原子、分子的振动、转动等作用使物质在特定的波长形成特有的吸收和反射特征,能够通过物质的反射(或吸收)光谱反映出物质的组成成分与结构的差异,然而这些吸收和反射特征在传统的多光谱遥感数据上很难清楚地体现(童庆禧和田国良,1990)。

高光谱遥感具有不同于传统遥感的新特点,主要表现在:①波段多——可以为每个像元提供几十、数百甚至上千个波段;②光谱范围窄——波段范围一般小于 10nm ;③波段连续——有些传感器可以在 $350 \sim 2500\text{nm}$ 的太阳光谱范围内提供几乎连续的地物光谱;④数据量大——随着波段的增加,数据量呈指数增加;⑤信息冗余增加——由于相邻波段高度相关,冗余信息也相对增加(张良培和张立福,2005)。随着信息的不断丰富,目前海量数据的处理,软件都不是很完善,致使海量数据的信息得不到充分的挖掘与处理,信息处理不能够满足现实需要。因此,遥感信息处理技术还有待进一步研究与开发。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 植物在外界胁迫作用下的光谱信号特征

Larcher(1987)这样描述植被胁迫:“...a state in which increasing demands made up-

on a plant lead to an initial destabilisation of functions...if the limits of tolerance are exceeded and the adaptive capacity is overworked, the result may be permanent damage or even death”研究表明适度的胁迫会激活植物细胞的新陈代谢与生理活动,并不会造成损害,即使是长期的。但是,过度胁迫会对植物造成损害,如果胁迫不去除,植物甚至会落叶或最终死亡。

植被出现枯萎、发黄是对缺乏矿物质及病害的反应,能够利用遥感进行探测因为在黄波段(580nm)反射率增加,但是很难确定胁迫症状出现的原因,因为在很多种胁迫下,枯萎是植物都会出现的反应,如干旱与真菌病害能够在红外波段产生相同的影响(Carter, 1993)。所以,利用遥感可以探测植物处于胁迫条件下,但难以识别究竟是什么因素导致的胁迫。

1.3.2 高光谱遥感识别与探测作物病害胁迫

传统的病虫害监测主要是由植保人员田间取样、调查,综合其他农情数据,做出决策,但是传统的方法在病虫害大面积发生的时候,费时、费力,且无法准确预报发生的面积及严重度,致使无法指导使用农药及杀虫剂的量,导致环境遭到污染。而利用高光谱遥感技术不仅可以大面积、快速、简便、无损探测各种作物的病虫害,还可以有效指导病虫害防治,以及决策支持等。

研究表明小麦在病害胁迫之下,病害小麦的光谱反射率在可见光波段大于正常小麦的光谱,而在近红外波段则小于正常小麦的光谱(Huang et al., 2007; 刘良云等, 2004)。Zhang 等(2003)研究表明不同病害胁迫程度的马铃薯光谱在近红外波段有较大的不同,不同品种之间也存在光谱差异。Zhang 等(2005)利用 5 点聚类法识别西红柿的病害胁迫,且能够在造成经济损失之前就可以区分出病害与健康的西红柿。

植物在病菌的胁迫下,总体上会影响作物叶绿素的光合作用和光学辐射,致使在 400~700nm 区域光谱反射率增强(Knipling, 1970)。Malthus 和 Madeira(1993)测量了感染真菌的大豆叶片反射率(400~1100nm),随着病情的加重,在可见光区域光谱逐渐平坦,而在近红外 800nm 出现降低。Lelong 等(1998)利用近红外以及可见光波段信息绘制小麦胁迫图。Delalieux 等(2007)利用 1350~1750nm 与 2200~2500nm 区域信息,在遭受生物胁迫后即可从健康作物中识别出病害胁迫的作物。黄木易等(2003)研究表明 630~687nm、740~890nm 及 976~1350nm 为遥感监测条锈病的敏感波段。Huang 等(2007)利用 PRI 反演小麦病害严重度,取得较好效果。蒋金豹等(2007c)研究发现病情指数与一阶微分在 432~582nm、637~701nm 及 715~765nm 区域内有极显著相关性。刘良云等(2004)利用多时相的航空高光谱遥感影像监测小麦条锈病,取得较好效果。竞霞等(2010)研究了棉花在黄萎病胁迫下的光谱特征,认为红光光谱(650~700nm)是识别棉花单叶黄萎病病情严重度的最佳波段。刘占宇等(2008)研究发现水稻在受到病虫害胁迫后,“红边”和“蓝边”均发生蓝移,向短波方向偏移 10nm 左右;“绿峰”和“红谷”则均发生红移,向长波方向偏移 8nm 左右。蒋金豹等(2010)发现一阶微分光谱的红边与黄边距离可以提前肉眼 12 天识别出小麦条锈病。

1.3.3 条锈病胁迫下小麦生理生化参数变化及定量反演

1. 植被叶绿素浓度高光谱遥感定量反演

植被光合作用过程中起吸收光能作用的色素有叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)和类胡萝卜素(Cars),其中,叶绿素是吸收光能的物质,直接影响植被对光能的利用和吸收(Filella and Peñuelas,1994;唐延林等,2003)。植被色素含量与其光合能力、发育阶段和营养状况有较好的相关性,它们通常是植被环境胁迫、光合作用能力和植被发育阶段的指示器(Collins,1978)。张宏名(1994)研究了小麦叶绿素含量与可见光反射率之间的关系。Horler 等(1983a,b,c)研究了植被光谱与叶绿素浓度的关系,并提出了光谱“红边”位置在植被叶绿素浓度估计中的应用。Blackburn(1998)研究表明冠层与叶片单位质量色素浓度和 $\text{Log}(1/R)$ 的一阶导数、二阶导数强相关。

2. 植被氮素含量高光谱遥感定量反演

测量作物叶片氮素含量是精准农业中一项重要而又关键的工作,只有精确诊断作物的营养水平,才能及时进行精确、科学施肥。Walburg 等(1982)研究认为玉米冠层的光谱测量可用于检测氮水平;薛利红等(2004)认为与小麦叶片含氮量关系最佳的指数为红波段(660nm)和蓝波段(460nm)的组合;Fernandez 等(1994)发现用红光(660nm)和绿光(545nm)两波段的线性组合可以预估小麦的氮含量;王人潮等(1993)、Cheng 等(2003)通过研究认为水稻氮素营养与光谱特征有良好的相关关系,通过光谱测定可以诊断水稻不同的氮素水平;刘宏斌等(2004)发现采用红光波段和近红外波段计算的比值植被指数 RVI 可以较为灵敏地反映冬小麦氮素营养水平;Mutanga 等(2003)用包络线去除法研究作物在不同供氮水平下光谱吸收特征,发现施氮肥过量的作物比缺氮作物的吸收谷要深且宽;黄文江等(2004)利用归一化最小振幅来反演叶片全氮含量;张喜杰等(2004)研究认为原始光谱,以及一阶微分光谱都可用于温室内叶片含氮量的预测,而且一阶微分光谱在一些特殊的波长处具有更强的预测能力;Yoder 和 Pettigrew-Crosby(1995)发现树叶 TN 与 $\text{Log}1/R$ 的一阶微分之间显著相关;牛铮等(2000)建立了微分光谱与鲜叶片中的蛋白质、全氮(TN)、全钾(TK)含量的多元逐步回归方程;Zhao 等(2005)研究表明叶氮不仅与 R_{405}/R_{715} 、 R_{1075}/R_{735} 极显著相关,而且与 730nm 或 740nm 处一阶微分值极显著相关。Feng 等(2008)发现可见光及近红外光谱区域对叶片氮素含量较为敏感,且红边区域与叶片氮素浓度具有较高的相关性。Clevers 等(2012,2013)研究表明指数 Clgreen、Clred-edge 估测作物冠层氮素含量具有较好的鲁棒性。Tian 等(2014)研究发现指数 $\text{SR}(R_{553}, R_{537})$ 是估测水稻叶片氮素含量的最佳指数。蒋金豹等(2008)研究表明以微分指数 SD_r/SD_b 构建的对数模型能很好地估测冬小麦叶片全氮(leaf total nitrogen, LTN)含量。冯伟等(2009)发现一些红边参数(GM2 、 SR_{705} 和 FD_{742})能有效监测小麦叶片氮素的营养状况。熊鹰等(2013)研究表明叶片氮素含量与处于 480~520nm 和 680~720nm 范围内的波段具有较高的相关性。

3. 植被叶绿素密度高光谱遥感定量反演

叶绿素含量是植物生长过程中一个重要的生化参数,对植被光合能力、发育阶段以及营养状况有指示作用。叶片叶绿素浓度只能够反映单株植物的长势,而冠层叶绿素密度(canopy chlorophyll density, CCD)是单位面积叶绿素的含量,恰好与遥感获取的面状信息相对应,因此,研究 CCD 遥感估测方法就显得十分重要。目前,国内外有些学者已经开始这方面的研究。Pinar 和 Curran(1996)研究发现草丛冠层光谱“红边”位置能较好地反映出叶绿素密度信息;吴长山等(2000)、黄春燕等(2007)分别研究了水稻、玉米、棉花冠层光谱与叶绿素密度相关性,发现 762nm 反射率与叶绿素密度高度相关;王登伟等(2008)发现 750nm 一阶微分光谱值与叶绿素密度高度相关;Hansen 和 Schjoerring(2003)研究了小麦高光谱反射率与叶绿素密度等变量的相关波段,认为红边光谱范围内是敏感波段。Broge 和 Mortensen(2002)研究认为,用红边窄波段构建的植被指数能够提高 CCD 的预测精度;杨峰等(2010)研究表明,小麦在波长 800nm 处光谱反射率与叶绿素密度的回归模型的决定系数达到 0.8884;冯伟等(2013)通过研究白粉病胁迫下小麦冠层叶绿素密度认为,以归一化角度指数(NDAI)构建的 CCD 估算模型决定系数最大,相对误差最小;蒋金豹等(2010)发现,利用高光谱遥感微分指数 $(D_{750} - D_{550}) / (D_{750} + D_{550})$ 反演 CCD 的指数模型精度较高;梁亮等(2012)对小麦冠层叶绿素含量进行高光谱反演结果表明,利用偏最小二乘支持向量回归(LS-SVR)算法反演的精度较高,要优于线性回归方法。

4. 植被相对含水量高光谱遥感定量反演

植物的水分含量对于植物的生长具有重要意义。常规方法是通过人工采样在实验室内进行测定,而随着高光谱遥感技术的发展,利用高光谱遥感反演植物水分含量逐步成为了现实。早在 1971 年,Thomas 等就研究了叶片含水量与光谱反射率之间的关系,表明 1450nm 和 1930nm 的反射率与叶片的相对含水量显著相关,而 Jackson 和 Ezra(1985)曾指出作物水分胁迫状况能够在光谱反射率数据中体现。王纪华等(2001)、Carter(1991)研究证实 1450nm、1940nm 和 2500nm 附近为水分的敏感光谱波段。吉海彦等(2007)在 1400~1600nm 的光谱范围建立了水分含量与反射光谱的模型,水分的预测值与真实值的相关系数为 0.999,相对标准偏差为 0.3%。Shibayama 和 Akiyama(1989)研究发现 960nm 处的导数光谱可用来监测水稻的水分亏缺状况。王纪华等(2000)、Tian 等(2001)利用近红外 1650~1850nm 波段的吸收深度与吸收面积反演小麦单叶水分状态。田永超等(2004)利用统计方法研究了不同土壤水、氮条件下的小麦冠层反射特性与叶片和植株水分状况的相关性,提出了一种新的植被水分指数 $R_{(610,560)} / D_{(810,610)}$ 预测小麦水分状况。Seelig 等(2008)利用可见光、近红外以及短波红外的比值指数反演百合的叶片相对含水量(RWC),发现比值指数 R_{1300} / R_{1450} 与叶片含水量具有较好的相关性。Danson 等(1992)研究发现水分吸收波段 1360~1470nm 和 1830~2080nm 的叶片反射率一阶导数与叶片含水量高度相关,且不受叶片结构的影响。Penuelas 等(1993a)研究发现用水分指数 WI ($WI = R_{900} / R_{970}$)能够较好地反演水分状况的变化。Filella 和 Peñuelas(1994)在 400nm 与 700nm 处,以及对归一化差值植被指数等研究也发现了水分含量对叶片反射率有影

响,另有研究表明 WI/NDVI 既可以用来预测单叶的水分含量,同时还可以预测冠层的水分含量,且可以提高水分预测的精度(Peñuelas et al., 1997, 1999)。

5. 植被叶面积高光谱遥感定量反演

叶面积指数(LAI)可以预测作物的长势与产量(Rasmussen, 1997),在监测冠层结构变化,以及生物或非生物胁迫方面也具有重要作用(Coppin et al., 2004)。叶面积指数会影响到冠层小气候,包括风、温度及适度等,小气候不仅影响着植物本身状况而且也影响着其他生物体,如害虫和病原体等,因而叶面积指数的变化对于病虫害的监测也非常有意义(Welles, 1990)。

叶面积可以通过人工方法进行测量,但是该方法费时、费力且在较远、偏僻的位置并不可行(Jonckheere et al., 2004)。国内外许多学者利用遥感方式测量植物叶面积,取得较好效果。刘占宇等(2008)提出包含蓝、绿、红和近红外四个谱段的调节型归一化植被指数(ANDVI)估测水稻叶面积,ANDVI 指数模型预测效果最好。王秀珍等(2004)用水稻红边内和蓝边内一阶微分总和和归一化值反演水稻的叶面积。杨晓华等(2008)利用支持向量机方法研究高光谱反演水稻叶面积反演,结果表明基于 TCARI/SAVI 的 SVM 模型具有最高的估算精度,其 RMSE 比相应的统计模型降低近 11 个百分点。Hansen 和 Schjoerring(2003)研究发现小麦 680~750nm 光谱反射率与叶面积指数有较好的相关性。Nguyen 和 Lee(2006)建立的水稻近红外 800nm 和红光 670nm 波段的反射率组成的归一化植被指数、土壤调节植被指数和修改的土壤调节植被指数与水稻的叶面积指数的线性模型决定系数 R^2 均在 0.52 以上。

上述指数都利用了可见光波段信息反演 LAI,由于可见光区域光谱反射率易受色素含量的影响,而小麦在感染条锈病后,色素含量会逐渐减小(蒋金豹等,2010),而近红外与短波红外波段反射率对色素含量的变化相对不敏感,因此 Delalieux 等(2008)利用近红外归一化指数(sLAIDI)反演果树叶面积,其反演结果优于 NDVI 以及 MCARI2 指数。

1.3.4 土壤中 CO₂ 浓度变化对植被的影响

众所周知,植物只有绿色细胞可直接利用光能进行光合作用,其他生命活动所需的能量都依赖于呼吸作用。因此,植物的根部需要通过有氧呼吸作用将有机物质生物氧化,为植物生长提供营养物质。对于透气性良好的土壤,其气体成分通常与外部大气成分基本一致(Hillel, 1998)。但 CO₂ 气体从地下泄漏进入土壤中会改变土壤中的氧气含量,从而影响植物根部的呼吸作用(Smith et al., 2005a; Steven et al., 2006)。

目前随着全球气候变化,模拟研究大气中 CO₂ 浓度增大对植被生态系统的影响相关研究较多(朱春梧等,2006;黄建晔等,2003),但对土壤中 CO₂ 浓度增大对陆地植被的影响研究较少。随着 CCS 技术进行试验性研究,地下封存的 CO₂ 有可能出现泄漏,无论是缓慢泄漏还是大规模泄漏,都会对陆地生态系统造成影响,也引起了不少学者的关注(Beaubien et al., 2008; Hepple and Benson, 2005; Lewicki et al., 2005; Oldenburg and Lewicki, 2006; Pearce and West, 2006)。在意大利与冰岛 CO₂ 气井附近土壤中 CO₂ 浓度较高,周围植物叶片出现提前衰老且光合能力显著下降的情况(Cook et al., 1998; Migli-

etta et al., 1998)。当土壤中 CO_2 浓度较高时,会使土壤的 pH 降低(Celia et al., 2002),从而影响土壤矿物质溶解(Stephens and Hering, 2002);会影响土壤中的氧气含量,干扰植物的正常呼吸,致使植物无法有效吸收养分(Cotrufo et al., 1999),因此 CO_2 泄漏进入土壤植物会出现发育不良、植株矮小等现象,甚至枯死(Maček et al., 2005; Bergfeld et al., 2006)。地下 CO_2 泄漏对土壤湿度的影响微乎其微,但 CO_2 浓度高的地方会限制植物的生长(Vodnik et al., 2009)。Noomen 和 Skidmore(2009)通过模拟实验研究 CO_2 泄漏对玉米的影响,发现随着土壤 CO_2 浓度的增大,玉米的高度、叶绿素含量及干物质量都降低了,Jiang 等(2011)、Lakkaraju 等(2010)研究结果与上述结论一致,玉米的叶绿素 a 与叶绿素 b 含量都降低了。Boru 等(2003)发现当土壤中 CO_2 浓度达到 50% 时,大豆就会出现严重的萎黄病症状,坏疽或者根部坏死。Patil 等(2010)通过人工模拟实验研究发现当 CO_2 以 1L/min 注入土壤中,土壤中的大豆发芽率仅为正常水平的一半, CO_2 泄漏胁迫区牧草产量与对照区相比显著降低。Beaubien 等(2008)研究结果表明在 CO_2 泄漏点核心区植物无法生存,土壤 pH 达到 3.5,矿物质含量与化学参数有少许变化。

1.3.5 地下封存 CO_2 泄漏胁迫下地表植被光谱响应规律研究

地下封存的 CO_2 泄漏进入土壤会阻碍植被的正常呼吸与营养吸收,胁迫植被的生长,致使其光谱特征发生变化。Noomen 和 Skidmore(2009)研究表明 CO_2 泄漏胁迫下的玉米的一阶微分光谱黄边位置与红边位置都会发生变化,且利用红边位置与黄边位置之差可以较好地预测玉米叶绿素含量。Smith 等(2002, 2004a, b)研究发现大麦、草地等植物在天然气泄漏胁迫下一阶微分光谱值在红边内逐渐减小,并伴有多峰与蓝移现象,且利用 725nm 与 702nm 处的一阶微分比值指数能够较好识别健康草地与胁迫的草地。Bateson 等(2006, 2008)研究发现 CO_2 泄漏胁迫植物的光谱反射率在红光区与近红外显著低于正常植物的光谱反射率,并利用高光谱遥感识别 CO_2 泄漏点,取得了较好的效果。蒋金豹等(2013b)利用连续统去除法处理大豆在 CO_2 泄漏胁迫下的光谱数据,发现面积植被指数 $\text{Area}_{(510\sim590\text{nm})}$ 能够识别遭受 CO_2 泄漏胁迫的大豆。Jiang 等(2014)研究大豆在 CO_2 泄漏胁迫下单叶与冠层光谱特征,发现一阶微分指数 SD_r/SD_g 不仅适用于单叶光谱,且适用于冠层光谱。Jiang 等(2015)研究了玉米、大豆、莴苣、甜菜、卷心菜在 CO_2 泄漏胁迫下的单叶光谱变化特征,发现 $\text{Area}_{\text{red}}/\text{Area}_{\text{green}}$ 识别效果最好。应用比值指数定量反演 CO_2 泄漏胁迫下的甜菜的水分含量与反演玉米叶绿素含量(Jiang et al., 2011, 2012),取得了较好的效果。Lakkaraju 等(2010)研究表明植物的光谱一阶微分的最小值为 575~580nm,最大值为 720~723nm,并研究了胁迫植物的 SIPI、NFDI、Chl NDI 等几种光谱指数的变化规律。遭受 CO_2 泄漏胁迫的植物光谱在可见光区域光谱反射率逐渐增大,而在近红外区域逐渐降低,同时红边位置出现蓝移现象(Boru et al., 2003)。Keith 等(2009)研究发现 CO_2 泄漏胁迫区的植物光谱在 650~750nm 出现明显变化。Govindan 等(2011)应用一种基于地统计学与概率方法融合光谱与空间信息检测地下储存 CO_2 泄漏胁迫的植被,经实地验证该方法探寻 CO_2 泄漏点的成功率较高。

1.3.6 水浸胁迫对地表植被的影响及光谱响应规律

Trought 和 Drew(1980)发现水浸对小麦的早期影响是出现斑点,观察到这一现象仅

仅在实施胁迫 6 个小时且土壤中的氧气浓度为 10% 的时候;水胁迫两天后,叶绿素浓度开始降低,15 天后前三片叶子开始变黄。Drew 和 Sisworo(1979)发现同样的规律对于大麦,这表明适度的氧气缺乏在土壤中仍旧对植物的正常功能有显著的影响。叶片的萎黄病与生活在水浸土壤中的大豆与西红柿组织内部乙烯浓度的增加有紧密的联系(Drew and Lynch, 2003)。氧胁迫下的根会流出更多的可溶解的代谢物与乙醇,且这些物质会刺激游走孢子的趋药性运动,而导致植物易于患病。

Anderson 和 Perry(1996)发现在湿地地区水淹的树在 550nm 以及近红外 770nm 附近的反射率与没有被水淹的树相比都增加了。Pickerill 和 Malthus(1998)在英国柴郡的一个沟渠发生漏水事件发现,漏水导致周围的植被被水严重浸泡,植被生长受到阻碍,变黄与稀少。与没有受到胁迫的植被相比,在泄漏中心点附近的植被反射率在可见光区域增加,而在近红外部分降低。蒋金豹等(2013a)发现水浸胁迫下的玉米与甜菜,其光谱反射率在 550nm 与 800~1300nm 区域降低,而在 680nm 区域略微增大。