

中国科学院“百人计划”资助项目

国家自然科学基金资助项目

霍英东基金资助项目

旱区水—土—作物关系 及其最优调控原理

WATER-SOIL-CROP RELATION AND ITS OPTIMUM
REGULATION IN ARID AND SEMIARID AREAS

康绍忠 梁银丽 蔡焕杰等 著

中国农业出版社

中国科学院“百人计划”资助项目
国家自然科学基金资助项目
霍英东基金资助项目

旱区水—土—作物关系及其 最优调控原理

WATER—SOIL—CROP RELATION
AND ITS OPTIMUM REGULATION
IN ARID AND SEMIARID AREAS

康绍忠 梁银丽 蔡焕杰等 著

中国农业出版社

旱区水—土—作物关系及其最优调控原理

康绍忠 梁银丽 蔡焕杰等 著

* * *

责任编辑 彭明喜 段丽君

中国农业出版社出版 (北京市朝阳区农展馆北路2号 100026)

新华书店北京发行所发行 **北京科技印刷厂印刷**

787mm×1092mm 16开本 19.5印张 430千字

1998年3月第1版 1998年3月北京第1次印刷

印数 1~500册 定价 75.00元

ISBN 7-109-05139-0/S·3256

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

前 言

水—土—作物关系是水分、土壤、作物、大气诸因素之间相互作用、反馈影响的结果，构成了一个由土壤经植物到大气的互反馈连续系统。其研究的尺度也包括了较大区域范围内的宏观问题和小至农田内部单元的微观问题。因此，我们的研究力求从宏观和微观两种尺度上把水—土—作物关系与最优调控及其对土壤生产力和作物产量的影响综合起来，以水为纽带，将水—土—作物关系及其最优调控和农业节水、水土流失及生态环境和农业的持续发展问题有机地结合起来，使该领域由过去孤立的研究土壤—水环境关系、作物—水环境关系、土壤水—作物关系、作物—大气关系，转变为用连续的、系统的、动态的观念和定量的方法研究水—土—作物关系与最优调控及其对农业节水与水土保持和生态环境的效应，促进多学科相互交叉、渗透，发展新的学科生长点，使该领域的研究真正形成一门有较严谨的理论基础和定量方法的科学；同时达到协调水土关系、减少水土流失、最优利用水土资源、提高农作物产量，并为农业的持续性发展创造良好的水土资源环境条件的目的，为黄土高原地区的农业节水和水土保持工作服务。

围绕这一目标，我们从 80 年代初就开始进行此方面的田间试验及理论分析研究工作。近 10 余年来我们在该领域的研究先后获国家自然科学基金资助项目 6 项、霍英东基金 1 项、水利部水利水电科学基金项目 1 项、中国科学院“百人计划”资助项目 1 项，国家攻关课题和横向资助项目 10 余项。先后在室内和西北农业大学灌溉试验站、中国科学院长武生态试验站、安塞水土保持综合试验站、宁夏吴忠、内蒙古翁牛特旗等地进行了多年的试验观测研究，积累了长系列的试验研究资料。1992 年曾对有关研究工作进行了初步总结，在水利部科技专著出版基金的首批资助下由水利电力出版社出版了《土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用》一书。但近几年，在中国科学院“百人计划”项目资助下，在中国科学院、水利部水土保持研究所和西北农业大学领导的共同帮助与支持下，组成了包括中国科学院、水利部水土保持研究所“黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室”和西北农业大学农业水土工程研究所两个单位，涉及农业水土工程、作物生理生态、土壤物理、农业气象、水土保持等学科领域的 10 余名青年科技人员的研究集体。又购回了 CID301 便携式光合测定系统、DX100 型离子色谱仪、TDR 土壤水分测定仪和 AG 型多用红外冠层温度仪、GUELPH 野外渗透仪等先进的测试仪器。对此领域进行了更加深入、系统的研究，其内容涉及到如下几方面：

(1) 土—植—气连续体水分运转以及水盐、水热耦合运移的试验研究。主要在杨陵室内实验室、人工气候室和长武生态站布设了有关试验。在实验室内布设了黄土区 3 种典型土壤（黄绵土、塬土、黑垆土）的水分滞后效应及其对土壤水分再分布影响的试验；在长武生态站人工模拟土柱内进行了田间条件下水分滞后效应对作物根系吸水影响的试验；在人工气候室内先后进行了 2 种土壤、3 种小麦品种在不同土壤水势条件下土—根界面行为

及其水势降低时根系的收缩程度、水分传导率变化的试验研究,在实验室内进行了100多组温度变化对土壤水分运动参数和土壤水分循环影响的试验。对溶质(养分)(NH_4^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 NO_3^-)在黄土性土壤中的物理化学行为进行了试验研究,测定了溶质在土壤中的吸附特征(吸附等温线);饱和与非饱和土壤中溶质(养分)运移的水动力弥散系数,以及土壤质地、容重、溶液浓度和环境温度等对水动力弥散系数的影响关系;测定了入渗和排水条件下溶质(养分)在饱和与非饱和土壤中的运移规律,并对其进行了数值模拟;对存在根孔的土壤中溶质的优势流特征进行了初步试验研究。

(2)在大型人工气候室内进行了大气 CO_2 浓度增加对作物水分循环和水分利用影响的试验研究。试验设高、中、低3种土壤水分处理,每种土壤水分处理设2次重复,除了用高40cm,直径20cm的盆栽试验外,为了研究土壤剖面上水分动态的变化,还设置了直径33cm,高1m的模拟土柱。供试作物为春小麦、玉米、棉花和大豆,设置 $350\mu\text{g/g}$ 和 $700\mu\text{g/g}$ 2种 CO_2 浓度处理,在全生育期不同阶段用LI-6200型便携式光合作用测定系统测定各处理中作物叶片温度、气孔阻力、蒸腾速率、光合速率、叶气腔中的 CO_2 浓度等指标的日变化,人工气候室自控系统自动记录室内光照、温度、相对湿度等的日变化,用称重法和TDR法测定土壤含水率变化而获得蒸发蒸腾量,观测不同阶段的作物生长状况等,同时还研究了土壤水分条件和大气 CO_2 浓度增加的共同作用对作物水分循环和利用的影响。

(3)作物—水分—环境关系最优调控试验研究。在长武生态站和杨陵布设了试验,其中长武布设了30个小区,分设不同阶段受旱和不同受旱水平的处理,在玉米和冬小麦典型阶段用CID301便携式光合测定系统测定不同受旱处理的叶温、气孔阻力、蒸腾速率、光合速率等因素的日变化,逐小时观测,亦用AG型多用红外测温仪测定玉米冠层温度的日变化,用中子水分仪测定0~200cm深的土壤水分变化,每10cm测定一次,在生育期内测定植株干物质质量、叶面积指数,最后测定玉米产量及其构成。在西北农业大学灌溉试验站主要布设了3种土壤水分处理的试验,其试验方法同长武站布设的试验。通过这些试验,力求建立作物水分、养分、环境、产量综合模型和建立更为完善的作物缺水诊断方法。在中国科学院、水利部水土保持研究所田间试验场进行了土壤水分亏缺和氮磷营养交互作用的试验,设置不同的土壤含水率和施氮、磷水平,以研究不同土壤水分条件下有利于作物生长和提高产量的肥料用量,以达到通过科学施肥,建立合理的根苗系结构,提高作物水分利用效率的目的。

(4)黄土区下垫面条件与水土保持措施对区域水量转化关系影响的试验研究。在内蒙古敖包小流域进行了不同下垫面条件与水土保持措施坡地降水入渗产流、产沙的试验观测,该流域 15.2km^2 ,黄土层覆盖在10m以上。在现场取土样进行了土壤水分运动参数的试验研究;在野外流域上、中、下游不同土地利用条件下进行了土壤入渗性能的研究,共进行了32组试验,每组两次重复,并用TDR水分测定仪连续观测入渗过程中的土壤水分动态变化;雨季在人工径流小区(20,40和60m等3种坡长、天然草地、裸地、苜蓿地、沙打旺地和有水平坑措施等条件)进行不同坡长、不同下垫面条件的天然降水入渗产流产沙动态过程观测。在常规试验的基础上,在坡面每隔5m布置有TDR波导棒,波导棒长度有15,30,45,60和70cm等5个深度,用于连续观测天然降水情况下坡面不同位置的入渗动态变

化状况和入渗后土壤水分再分布状况。在陕西省长武试验区王东沟小流域上、中、下游不同土地利用条件下进行了土壤水分入渗性能分布的试验,共进行了26个点的试验;还进行了农田不同坡度和不同作物种植条件下以及坡面林地和草地的降雨入渗、产流动态和土壤水分再分布过程的观测。其观测方法与教包小流域类似。布设了庭院(包括屋面)和道路降雨产流的试验。其目的是研究小流域尺度的区域水量转化关系和进行雨水资源潜力的分析。

(5) 天然降水条件下不同下垫面环境水沙关系及其调控的试验研究。在富县和安塞等地布设了野外径流场,其中完成富县5组野外径流场的布设和安塞6组自然坡面径流场的布设,已投入使用两年,观测到富县15次和安塞8次天然降雨条件下的径流泥沙和土壤、泥沙养分资料,并对林地、农地(谷子、糜子)、撂荒地、开垦裸露地径流—侵蚀—土壤水分进行了观测,还就坡形对侵蚀产沙和水量转化的影响进行了试验观测,共设有5种坡形(直形坡、凹—凸—凹,凸—凹—凸,凹—凸—直,凸—凹—直)。

通过上述室内试验、人工气候室试验、野外站点试验和径流小区试验,积累了20余万组土壤水分运动参数,根系传导,温度变化对土壤水运动的影响,土壤—植物系统溶质(养分)运移, CO_2 浓度增加对作物水分循环和作物水分利用效率的影响,不同阶段和不同强度缺水对作物光合作用、蒸腾速率、气孔阻力、冠层温度、水分利用效率、蒸发蒸腾量的影响,流域入渗性能的空间分布,降水入渗在坡面上的分布以及天然降水产流、侵蚀产沙、庭院和道路产流等观测数据。并取得了一些新的发现与进展,主要有如下几方面:

(1) 作物根系,特别是根尖在水分胁迫下,会发生收缩,其收缩的程度随根系胁迫的程度加剧而增大。根系收缩,使土—根接触部位产生一定的空气间隙,土—根系统内的水分运动不再是连续流,而存在一定的状态变化(液—汽—液),相应的根系导水率也产生变化,使土—根系统水流阻力变大。这种状况对于不同土壤和不同作物品种有所不同,根据小偃六号、郑引、陕合3个小麦品种的试验发现,这种根系收缩的程度和土—根界面行为的强弱与其抗旱性有密切的关系。在水分胁迫下,作物根系与土壤之间的这种界面行为是评价作物抗旱性的一个重要指标,扩展了对作物抗旱机理的认识。

(2) 通过试验发现在一般水分条件下,玉米、向日葵的根系水分传导随根—土环境温度增加而增加,其增加的幅度与作物生育阶段有关,但当向日葵根—土环境温度高于 35°C 、玉米高于 30°C 时,其根系水分传导随温度增加而降低;在临界温度范围内根系水分传导随温度增加的变化还受到土壤水分状况的影响,当根系水分胁迫十分严重时,低温条件的根系水分传导反而高于高温条件的,这是水分严重亏缺和温度变化共同作用引起的根系结构和膜透性变化以及其代谢作用变化所造成的。

(3) 大气 CO_2 浓度增加对小麦、玉米、棉花等作物的影响在不同土壤水分条件下明显不同;在低水分条件下,由于大气 CO_2 浓度倍增,引起的叶片气孔阻力增加的幅度小于高水分条件下的;低水分处理条件下的叶温增加值要小于高水分条件下的;冠层温度的升高在低水分条件下高于高水分条件的,而冠层—气温差的变化则是低水分条件的小于高水分条件的;光合速率增加的效应低水分处理明显大于高水分处理,而使单位叶片蒸腾降低的效应略小于高水分处理的;总蒸发蒸腾量减小的幅度则是低水分条件明显小于高水分条件的;株高、叶面积指数增加的比例低水分处理明显大于高水分处理的。大气 CO_2 浓度增加

对光合速率和生长的正效应及其对蒸发蒸腾的抑制作用削弱了水分胁迫对作物光合和生长产生的不利影响,在低水分条件下作物水分利用效率增加的比例大于高、中水分条件的。试验还证明,高 CO_2 浓度可以弥补水分胁迫条件下气孔下调引起的光合降低。

(4) 取得了不同时期和不同程度缺水对作物水分生理指标与产量影响的定量关系及定量诊断黄土区小麦、玉米等作物水分状况的指标,发现了作物缺水敏感指数与光合速率、蒸腾速率之间有较密切的关系,建立了作物不同生育阶段水分散失、光合作用及其产物分配与向经济产量转化的效率和土壤水分亏缺的关系,在缺水条件下作物群体光合产物的最优分配策略,即初步取得了在光合产物向经济产量转化效率较小的生育阶段适当限制光合产物积累,形成一定的水分胁迫,控制地上部分生长、促进根系深扎,而在光合产物向籽粒或果实转化效率较大的阶段保证供水,以提高有限水的最大经济效益的决策方法。通过研究光合作用与水分散失的耦合关系,表明蒸腾速率随气孔开度的变化近似为线性关系,而光合速率的变化则在气孔开度达到一定值后呈饱和状态,因此,从充分开放的气孔缩窄其开度将大量的减少作物的水分损失,而对光合速率的损失不大,即以不牺牲作物对 CO_2 的吸收来大大的减少作物的水分消耗,提高水分利用效率。根源 ABA(脱落酸)可以作为作物水分胁迫的信号,而且 ABA 的浓度随干旱发展而增加,它帮助植物检测土壤中的有效水量,并据此通过调节气孔开度而调节它的水分消耗,因此,可以通过改变土壤水分条件或改变根层土壤湿润的方式使作物节水调控成为可能。据此,我们还首次提出了“控制性交替灌溉”的新概念,并通过初步试验结果表明在维持产量不变的条件下节水效果显著。

(5) 揭示了黄土区不同水土保持措施和下垫面状况的土壤入渗性能、入渗过程中土壤水分动态和入渗后土壤水分再分布过程,取得了天然降水条件下不同水土保持措施和坡长试验小区的降雨—土壤水—坡面径流之间的水量转化关系及降雨入渗过程中的土壤水分动态和雨后蒸发条件下土壤水分的日变化规律,建立了二维坡地土壤水分运动基本方程和降雨条件下的坡地水量转化数值模型,可以模拟天然降雨过程中坡面不同位置的 actual 入渗、产流、坡面水深、流速变化、各深度处的土壤水分动态和坡面滞蓄水量、坡脚出流量的变化过程等。提出并采用结皮消减系数和权重系数考虑地表结皮对坡地水量转化的影响和通量边界的水量平衡问题,可使模拟结果的精度大为提高。

(6) 对黄土区坡面侵蚀条件下土壤水分动态和土壤侵蚀环境调控对坡面水量转化的影响等问题有一些新的认识,揭示了黄土坡面侵蚀产沙关系及其机理,取得了不同侵蚀带土壤水分的季节变化规律、降水入渗的分布规律、上方来水对细沟侵蚀带和浅沟侵蚀带土壤水分分布特征的影响关系等。

这些研究成果密切结合了黄土区的特点,在理论和方法上有所创新,为最终掌握旱区水—土—作物关系和最优调控的理论与方法,提高水分利用效率和减少土壤侵蚀,改善生态环境,促进农业持续发展的方向迈进了一步。

《旱区水—土—作物关系及其最优调控原理》一书是对作者近年来在以上领域所取得的创新性成果的系统总结。全书共九章,包括水—土—作物关系中的几个基础理论问题研究,黄土区作物对水分亏缺的生理反应与调控,用冠层温度诊断作物缺水状况的研究,土壤—植物—大气连续体水热耦合运移的数值模拟,大气 CO_2 浓度增加对作物水分利用和农田水文循环影响的试验研究,黄土区下垫面条件和水土保持措施对坡地水量转化关系的影响及

其数值模拟,西北旱区节水农业中作物水分最优调控问题,黄土区土壤—水环境中溶质(养分)迁移及其数值模拟,黄土区坡面土壤侵蚀过程与降水—土壤水转化相互影响等内容。本书以在黄土区取得的研究成果为主,但为了系统性,也少量引用了作者在其它地区所取得的研究结果,书中以论述农作物为主,但也包括了少量的林草植被—水分—环境关系方面的研究结果。

本书由康绍忠、梁银丽、蔡焕杰、郑粉莉、张富仓、黄明斌、孙景生、张书函、马清林、刘晓明、胡笑涛等著。各章的撰稿者在书中均有注明。全书由康绍忠主编、统稿。

旱区水—土—作物关系及其最优调控问题的研究是一项十分复杂的系统工程,作者的研究仅仅是该领域中的某几个方面,其研究成果也是初步的,对某些问题的认识还是较肤浅的,还有待于更进一步探索和深化。书中不足之处,恳请同行专家批评指正。

作者在有关旱区水—土—作物关系及其最优调控理论的学习与研究过程中,始终得到了许多老前辈的指教、领导的支持以及同志们热情帮助。首先感谢中国科学院、水利部水土保持研究所、西北农业大学有关领导的热情关怀和大力支持及黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室领导的帮助,中国科学院长武生态试验站、安塞生态试验站、西北农业大学灌溉试验站、内蒙古自治区水利科学研究所的积极支持。感谢在野外试验观测和资料分析整理过程中,西北农业大学水资源、水土保持和农田水利专业的本科毕业生齐志恩、崔学刚、张振华、刘继伟、陈玲军、史文娟、刘秀红、姚志宏、张志建、王天录、徐翀、张国瑜、李小平、韦忠、孟新惠等的辛勤劳动。感谢熊运章、李玉山、山仑、刘昌明、雷志栋、茆智、唐克丽、陈培元等先生对我们工作的指教。

康绍忠

1997年8月16日于杨陵农科城

目 录

前 言

第一章 水—土—作物关系中的几个基础理论问题研究	1
摘要(中、英文)	1
第一节 温度对土壤水分运动和保持影响的研究	2
一、温度对土壤水分保持影响的研究	2
二、土壤导水参数的温度效应及其数学模式	8
三、土壤水分入渗的温度效应及其数学模式	13
四、温度对土壤水分蒸发和再分布过程的影响	18
五、土壤水分运移的能垒分析	19
第二节 滞后效应对土壤水分再分布和根系吸水影响的研究	24
一、试验材料和方法	24
二、考虑滞后效应时的数学模型	25
三、数学模型的实现与计算结果分析	26
第三节 土—根界面水分运动及其品种间差异性的研究	29
一、土—根系统水流导度的计算与测定	29
二、土—根系统各部分水流导度的变化规律及其相对重要性和种间差异	31
参考文献	34
第二章 黄土区作物对水分亏缺的生理反应与调控	37
摘要(中、英文)	37
第一节 试验条件与研究方法	38
一、试验条件	38
二、研究方法	38
三、测定项目	39
第二节 作物光合作用的日季变化及其与土壤水分和气象因素的关系	39
一、不同生育阶段光合速率的变化	39
二、不同土壤水分条件下作物光合速率的日变化规律	40
三、不同天气条件下光合速率的日变化	43
四、不同天气条件和水分处理对光合速率的综合影响	45
第三节 不同程度水分胁迫对作物生理活动和产量的影响	45
一、水分胁迫对作物生长的影响	45
二、水分胁迫对光合产物分配的影响	46
三、水分胁迫对作物产量的影响	47
第四节 黄土区作物水分生产函数与有限水量在作物生育期的最优分配	48
一、作物水分生产函数的试验结果	48

二、作物缺水敏感指数与作物生理指标的关系	49
三、有限水量在作物生育期的最优分配方法	51
四、黄土区作物补灌的最佳模式	52
第五节 水分胁迫条件下氮磷营养对小麦生理特性、产量及水分利用的 调节	53
一、土壤水分和氮磷营养对小麦根系生理与生长的影响	53
二、限量灌水条件下磷营养对调节小麦生理生态状况的效应	58
三、限量灌水条件下的水肥最佳调控方案	64
参考文献	64
第三章 用冠层温度诊断作物缺水状况的研究	67
摘要(中、英文)	67
第一节 作物冠层温度的变化规律	67
一、田间试验研究方法	68
二、作物冠层温度与环境因素之间的关系	68
三、不同土壤水分条件下作物冠层温度的变化规律	71
第二节 用冠层温度与气温差诊断作物缺水状况	72
一、用冠层温度诊断作物缺水状况的适宜时间	72
二、利用 $(T_c - T_a)$ 诊断作物的缺水状况	73
第三节 诊断作物缺水状况的作物缺水指标法	74
一、试验研究方法	74
二、用 Idso 法诊断作物缺水状况	75
三、用 Jackson 提出的作物缺水指标诊断作物缺水状况	78
四、一种新的计算作物缺水指标(CWSI)的简化方法研究	80
参考文献	82
第四章 土壤—植物—大气连续体水热耦合运移的数值模拟	84
摘要(中、英文)	84
第一节 试验研究方法与土壤水热运动参数的确定	86
一、试验布置	86
二、田间观测项目与方法	86
三、土壤水热运动参数的确定	87
第二节 作物蒸发蒸腾与根系吸水模型	90
一、作物蒸腾模式及参数的确定	90
二、棵间土壤蒸发模型与土壤热通量的计算	92
三、作物根系吸水模式的确定	93
第三节 夏玉米冠层温度的模拟	93
一、模拟作物冠层温度的理论模式	93
二、冠层温度与气象因素间关系的统计分析模式	94
第四节 气孔阻力与冠层阻力的计算	96
一、气孔阻力模式的研究与确定	96
二、夏玉米冠层阻力的研究与确定	97

第五节 夏玉米生长盛期土壤—作物—大气连续体水热耦合运移的	
数值模拟	100
一、水热耦合运移数学模型的建立	100
二、水热耦合运移数学模型的实现	102
参考文献	108
第五章 大气 CO ₂ 浓度增加对作物水分利用和农田水文循环影响的	
试验研究	111
摘要 (中、英文)	111
第一节 国内外研究动态及本研究的内容	112
一、研究的意义	112
二、国内外研究动态	113
三、存在问题与本研究的内容	118
第二节 试验研究方法	119
一、试验布置与设计	119
二、试验测定项目与方法	121
第三节 大气 CO ₂ 浓度增加对作物水分生理指标和生长发育影响的研究	122
一、大气 CO ₂ 浓度增加对叶片气孔阻力的影响	122
二、大气 CO ₂ 浓度增加对叶温和冠层温度的影响	128
三、大气 CO ₂ 浓度增加对作物生长发育和作物水分利用效率的影响	131
第四节 大气 CO ₂ 浓度增加对农田水文循环过程影响的研究	143
一、大气 CO ₂ 浓度增加对蒸发蒸腾影响的试验研究	143
二、大气 CO ₂ 浓度增加对作物根系吸水和根区土壤剖面水分动态影响的研究	147
三、大气 CO ₂ 浓度增加对农田蒸发蒸腾影响的定量模拟	147
参考文献	151
第六章 黄土区下垫面条件和水土保持措施对坡地水量转化关系的影响及其	
数值模拟	156
摘要 (中、英文)	156
第一节 试验研究方法及其仪器精度分析	157
一、试验布置与观测方法	157
二、时域反射仪的测量性能分析	159
三、土壤水分运动参数的测定	162
第二节 不同水土保持措施与下垫面条件的土壤积水入渗特征	163
一、土壤入渗性能及其影响因素	163
二、积水入渗时的土壤水分动态变化及入渗后土壤水分再分布	168
第三节 不同水土保持措施和坡长条件下坡地降雨入渗、产流动态特征	172
一、产流条件下坡地降雨入渗、产流动态特征	172
二、不产流条件下坡地降雨入渗动态特征	178
第四节 坡地水量转化关系及其数值模拟	186
一、坡地水量转化机理分析	186
二、降雨条件下坡地水量转化关系的数值模拟	191

参考文献	208
第七章 西北旱区节水农业中的作物水分调控问题	212
摘要 (中、英文)	212
第一节 发展节水农业的紧迫性及其农业节水的途径	213
一、发展节水农业是促进西北地区农业持续发展的根本出路	213
二、西北地区节水农业的几种用水类型及其农业节水的途径	216
第二节 西北旱区作物水分最优调控中的几个基本理论问题	218
一、农田水分转化规律及其节水调控机理	218
二、缺水对作物的影响与提高作物水分利用效率的机理	218
三、缺水条件下作物调亏灌溉的机理与指标	219
四、作物水分最优调控的可行性及基本策略	220
五、区域水量转化关系与水调控理论	221
第三节 作物水分散失与光合作用的耦合关系及其节水农业中的水分最优 调控指标	221
一、水分亏缺对作物光合作用效应的评价指标	221
二、作物光合作用与水分散失的关系及水分利用效率的变化规律	223
三、节水农业中的作物水分调控理论问题	225
参考文献	227
第八章 黄土区土壤—水环境中溶质 (养分) 运移机制及其数值模拟	228
摘要 (中、英文)	228
第一节 土壤溶质 (养分) 运移参数的测定与研究	229
一、饱和水动力弥散系数的测定研究	230
二、非饱和水动力弥散系数的测定研究	233
三、土壤溶质 (养分) 运移参数的影响因素研究	237
第二节 溶质 (养分) 在土壤—水环境中的物理化学作用	247
一、土壤对溶质 (养分) 的吸附交换特征和模式	247
二、存在吸附交换条件下溶质 (养分) 运移的数学模拟	252
第三节 饱和与非饱和流土壤溶质运移的数值模拟	255
一、土壤溶质运移的数学模型及其发展状况	255
二、饱和与非饱和流土壤溶质运移的数值模拟	260
参考文献	267
第九章 黄土坡面土壤侵蚀过程与降水—土壤水转化相互影响的研究	269
摘要 (中、英文)	269
第一节 试验设计及研究方法	270
第二节 黄土坡面不同侵蚀分带侵蚀产沙关系及其机理	271
一、坡面侵蚀产沙分配及其变化规律	272
二、上方来水来沙对侵蚀产沙的影响	273
第三节 不同侵蚀条件下坡面各侵蚀分带土壤水分分布规律	275
一、降雨不产流时坡面各侵蚀分带土壤水分分布规律	275
二、轻度侵蚀条件下坡面不同侵蚀分带土壤水分分布规律	276

三、强度侵蚀条件下坡面土壤水分分布·····	279
四、上方侵蚀带径流、产沙对下方侵蚀带降水入渗的影响·····	281
第四节 侵蚀条件下影响坡面降水—土壤水转化的主要因素及作用机理·····	283
一、降雨特征对坡面水流沿程入渗量的影响·····	284
二、雨前含水率对坡面侵蚀产沙及径流沿程入渗的影响·····	285
三、坡形对坡面侵蚀与降水入渗的影响分析·····	286
参考文献·····	287

Contents

Foreword

Chapter 1 Study on the Several Basic Theoretical Problems about

Water—Soil—Crop Relation 1

Abstract 1

1.1 Effect of Temperature on Soil Water Movement and Retention 2

1.1.1 Effect of Temperature on Soil Water Retention 2

1.1.2 Effect of Temperature on Hydraulic Parameters of Unsaturated Soil and Its Mathematical Model 8

1.1.3 Effect of Temperature on Soil Water Infiltration and Its Mathematical Model 13

1.1.4 Effect of Temperature on Soil Water Evaporation and Redistribution Process 18

1.1.5 An Analysis of Energy Barrier of Soil Water Movement 19

1.2 The Hysteresis Effect on Soil Water Redistribution and Crop Water

Uptake by Roots 24

1.2.1 Experimental Materials and Methods 24

1.2.2 Mathematical Model with Hysteresis Effect 25

1.2.3 Model Testing and Results Analysis 26

1.3 Water Movement in Soil-Root Interface and Its Differences of Various

Crop Varieties 29

1.3.1 Measurement and Computation of Hydraulic Conductivity in Soil-Root Interface 29

1.3.2 Changes of Hydraulic Conductivity in Soil-Root System and Comparative Importance and Its Differences in Crop Varieties 31

References 34

Chapter 2 The Response and Adjustment of Crops to Soil Water Stress

on Loess Plateau 37

Abstract 37

2.1 Experiment Conditions and Study Methods 38

2.1.1 Experiment Conditions 38

2.1.2 Study Methods 38

2.1.3 Measurement Items 39

2.2 Daily and Season Change of Crop Photosynthesis and the Relationship

between It and Soil Water, Climatic Factors 39

2.2.1 The Season Change of Photosynthesis 39

2.2.2 The Daily Change of Crop Photosynthesis Rate 40

2.2.3	The Change of Crop Photosynthesis Rate under Different Weather Conditions	43
2.2.4	Comprehensive Effects of Different Weather and Water Conditions on Photosynthesis Rate	45
2.3	The Effects of Different Water Stress on Crop Physiological Activity and Yield	45
2.3.1	The Effect of Water Stress on Crop Growth	45
2.3.2	The Effect of Water Stress on Assimilative Matter Distribution	46
2.3.3	The Effect of Water Stress on Crop Yield	47
2.4	Crop Water Production Function and Optimum Distribution of Limited Water during Crop Development Stage on Loess Plateau	48
2.4.1	The Experimental Results of Crop Water Production Function	48
2.4.2	The Relationship of Water Stress Sensitivity Index and Crop Physiological Items	49
2.4.3	The Optimum Distribution Method of Limited Water during Crop Development Stage	51
2.4.4	The Optimum Model of Crop Supplement Irrigation	52
2.5	The Adjustment of Nitrogen and Phosphorus Supplied on Physiological Items	53
2.5.1	Effects of Soil Water, Nitrogen and Phosphorus Supplied on Root Physiology and Growth of Wheat	53
2.5.2	Effects of Phosphorus Supplied on Adjusting Physiology and Growth of Wheat Under Limited Irrigation	58
2.5.3	The Optimum Adjustment Programme of Water and Fertilizer under Limited Irrigation	64
	References	64
Chapter 3	Canopy Temperature as an Index of Crop Water Stress	67
	Abstract	67
3.1	The Pattern of Canopy Temperature Fluctuation	67
3.1.1	Material and Method	68
3.1.2	The Relationship between Canopy Temperature and Environmental Factors	68
3.1.3	The Pattern of Canopy Temperature Fluctuation under Different Soil-Drying Conditions	71
3.2	Using Canopy-Air Temperature to Evaluate Crop Water Deficit	72
3.2.1	The Optimum Time of Using Canopy Temperature to Evaluate Crop Water Deficit	72
3.2.2	Using Canopy-Air Temperature to Evaluate Crop Water Deficit	73
3.3	Using Crop Water Stress Index (CWSI) to Evaluate Crop Water Deficit	74
3.3.1	Material and Method	74
3.3.2	Using CWSI Developed by Idso to Evaluate Crop Water Deficit	75
3.3.3	Using CWSI Developed by Jackson to Evaluate Crop Water Deficit	78
3.3.4	A Simplified Method of Calculating CWSI	80

References	82
Chapter 4 Modelling of Coupled Water and Heat Transfer in Soil—Crop—Atmosphere Continuum	84
Abstract	84
4.1 Experiment Method and Determination of Soil Water and Heat Movement Parameters	86
4.1.1 Experiment Arrangement	86
4.1.2 Observation Item and Its Method	86
4.1.3 Estimation of Soil Water and Heat Movement Parameters	87
4.2 Models of Evapotranspiration and Water Uptake by Roots	90
4.2.1 Crop Transpiration Model and Its Parameters Estimation	90
4.2.2 Soil Evaporation and Heat Flux Model under Crop Canopy Shading	92
4.2.3 Model of Crop Water Uptake by Roots	93
4.3 Simulation of Summer Maize Canopy Temperature	93
4.3.1 Theoretical Model of Simulation Canopy Temperature	93
4.3.2 Empirical Model between Canopy Temperature and Meteorological Factors	94
4.4 Calculation of Leaf Stomatal and Canopy Resistances in Summer Maize Growing Season	96
4.4.1 Leaf Stomatal Resistance Model	96
4.4.2 Canopy Resistance Model	97
4.5 Numerical Simulating of Coupled Water and Heat Transfer in Soil—Crop— Atmosphere Continuum in Summer Maize Growing Season	100
4.5.1 Numerical Model	100
4.5.2 Simulating Results and Discussion	102
References	108
Chapter 5 Effects of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂) on Crop Water Use and Field Hydrologic Cycle	111
Abstract	111
5.1 Research Advances and the Contents of This Programme	112
5.1.1 The Significance of This Research	112
5.1.2 Research Advances in This Area	113
5.1.3 The Problem Existing in This Area and the Contents of This Programme	118
5.2 Experiment Method	119
5.2.1 Experiment Arrangement	119
5.2.2 Observation Item and Its Method	121
5.3 Effects of Increasing CO ₂ on Crop Physiological Index and Growing Status	122
5.3.1 Effect of Increasing CO ₂ on Leaf Stomatal Resistance	122
5.3.2 Effects of Increasing CO ₂ on Leaf Temperature and Canopy Temperature	128
5.3.3 Effects of Increasing CO ₂ on Crop Growing Status and Water Use Efficiency	131
5.4 Effect of Increasing CO ₂ on Field Hydrologic Cycle	143

5.4.1	Effect of Increasing CO ₂ on Evapotranspiration	143
5.4.2	Effects of Increasing CO ₂ on Water Uptake by Roots and Water Dynamics in Roots Zone	147
5.4.3	Simulating of the Effect of Increasing CO ₂ on Evapotranspiration	147
References		151
Chapter 6 The Influence of Soil Water Conservation Measures and Surface Conditions in Loess Area on Hillslope Water Exchange and Its Numerical Modelling		
Abstract		156
6.1	Experiment Method and Observation Instrument	157
6.1.1	Experiment Arrangement and Observation Method	157
6.1.2	Measurement Precision Analysis of Time-Domain-Reflectometry	159
6.1.3	Measurement of Soil Water Movement Parameters	162
6.2	Pond Infiltration Characteristics under Different Soil Water Conservation Measures and Surface Conditions	163
6.2.1	Soil Infiltration Capacity and Its Influential Factors	163
6.2.2	Soil Water Dynamics Under Infiltration Condition and Its Redistribution	168
6.3	Natural Rainfall Infiltration and Runoff Formation Characteristics under Different Soil Water Conservation Measures and Slope Length	172
6.3.1	Natural Rainfall Infiltration and Runoff Formation Characteristics under Having Runoff Condition	172
6.3.2	Natural Rainfall Infiltration Characteristics Without Runoff	178
6.4	Hillslope Water Exchange Relation and Its Numerical Simulating	186
6.4.1	Hillslope Water Exchange Mechanism Analysis	186
6.4.2	Numerical Simulating of Hillslope Water Exchange under Natural Rainfall Condition	191
References		208
Chapter 7 Optimal Regulation of Crop Water State in Water-Saving Agriculture of Northwestern China		
Abstract		212
7.1	Urgency Developing Water-Saving Agriculture and the Measures of Water-Saving	213
7.1.1	The Fundamental Way to Develop Water-Saving Agriculture in Northwestern China	213
7.1.2	Several Kinds of Water-Use and Water-Saving in Northwestern China	216
7.2	Theoretical Problem about Crop Water Regulation in Northwestern China	218
7.2.1	Field Water Exchange Laws and Water-Saving Regulation Mechanism	218
7.2.2	Effect of Water Deficit on Crop Growth and Water Use Efficiency Improvement	218
7.2.3	Mechanism and Index of Regulated Deficit Irrigation under Limited Water Supply	219
7.2.4	The Measure of Optimal Regulation to Crop Water	220