

● 李毅 王全九 王文焰 著

覆膜条件下 土壤水、盐、热耦合 迁移研究

FUMO TIAOJIANXIA
TURANG SHUI YAN REOUHE
QIANYI YANJIU

陕西科学技术出版社

覆膜条件下土壤水、盐、热 耦合迁移研究

李 毅 王全九 王文焰 著

陕西科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

覆膜条件下土壤水、盐、热耦合迁移研究 / 李毅, 王全九, 王文焰著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2006. 11
ISBN 7-5369-4201-X

I. 覆... II. ①李... ②王... ③王... III. 土壤学
IV. S15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 070708 号

出版者 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编: 710003
电话 (029) 87211894 传真 (029) 87218236
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社
电话 (029) 87212206 87260001

印刷 西北农林科技大学印刷厂

规格 787mm×1092mm 16 开本

插页 1

印张 10.75

字数 235 千字

版次 2006 年 11 月第 1 版
2006 年 11 月第 1 次印刷

定价 20.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

我国是一个水资源相对紧缺的国家,地处我国西北的新疆,干旱少雨,水资源不足,土壤次生盐碱化严重,水土不平衡的矛盾很突出。近年来发展起来的新种植技术——覆膜种植技术已在新疆等干旱半干旱地区取得良好效果,并得以大面积推广,据新疆 2001 年底的统计,新疆覆膜种植面积达 $137.46 \times 10^4 \text{ hm}^2$,其中各种覆膜灌溉面积为 $67.06 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。覆膜种植技术能提高水分利用的有效性,使土壤升温,蓄水保墒,改善土壤物理性状,并能抑制杂草,改善土壤微生物活动,提高肥料利用率,为作物提供适宜的水、肥、气、热、光等条件,从而提高粮食产量。采用该技术,不仅能解决干旱-半干旱地区早春农作物缺水和地温低等不利因素,而且增加了作物抗旱能力,同时能抑制干旱地区盐碱渍害的发生,确保农业生产产量的持续稳定增长。

目前国内外对覆膜条件下水、盐、热耦合迁移的机制还研究得不够完善,有必要进一步进行系统研究。覆膜增温的特点,使得温度场对水盐运动的影响成为一个不可忽略的重要研究课题。除温度规律以外,覆膜条件下温度场对水、盐运动的影响方面研究甚少。在特定温度场条件下,覆膜土壤水、盐运动规律需要进行系统研究,尤其在不同的水分循环过程中,由于上边界覆膜条件的不同,导致温度场中水、盐运动方式的改变,因此,研究覆膜不同开孔程度蒸发条件下土壤水、盐、热耦合过程是极其必要的。

本书是针对西北干旱-半干旱地区而撰写的,是几年间实验和分析工作的积累。田间土壤水分、盐分和温度变化使水、盐、热耦合迁移的过程极其复杂。采取理论分析与室内外实验相结合、以实验研究为主,大田与室内实验相结合、以室内实验为主,应用与机理研究相结合、以机理为主的技术路线,主要对覆膜条件下土壤水、盐、热耦合迁移特点进行了研究。

本著作得到西安理工大学王全九主持的国家自然科学基金项目、西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”、西北农林科技大学科研启动费、西北农林科技大学科研专项、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-131;10501-114)等项目的资助。

西安理工大学水资源研究所高级工程师张建丰和汪志荣教授在近几年给予我大量的帮助,沈冰教授给予了我热情的关怀与指导,费良军教授、罗纨副教授给予了我大力支持,中科院水保所邵明安研究员也在我研究过程中给予了真诚的关怀,我的大学同学潘渝工程师提供了部分地温资料。河海大学的缴锡云教授、中国农业大学的任图生教授和任理教授都在近年给予我诸多的关心和帮助,这些老师和同行们的帮助像一点一滴的水,与我的努力共同汇成了这本著作,在此一并表示真心的感谢!

李 毅

2006 年 6 月

Email:liyikitty@126.com

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 国内外研究现状	(6)
1.3 研究内容及方法	(16)
2 大田覆膜条件下土壤水热运移实验研究	(19)
2.1 宽地膜覆盖的棉田地温场特性	(19)
2.2 覆膜—不覆膜地温时空变化特征及其相关性	(25)
2.3 玉米田地温的时空变化特征及其预测预报	(29)
2.4 农田作物覆膜地温极值的时空变化	(35)
2.5 覆膜棉田地温时空序列的平均值	(42)
2.6 覆膜条件下气温—地温—水分分析	(48)
2.7 小结	(51)
3 等温条件下土壤水盐运动实验研究	(53)
3.1 垂直一维土壤水、盐运动实验系统	(53)
3.2 土壤非饱和导水率模型中参数的敏感性分析	(56)
3.3 垂直一维积水入渗的水盐运动	(60)
3.4 垂直一维积水入渗水分运动的理论关系及实验验证	(63)
3.5 有限和半无限土体等温再分布中的水盐运动	(65)
3.6 小结	(75)
4 温度势梯度作用下的水平一维土壤水、盐、热耦合迁移	(77)
4.1 水平一维土壤水、盐、热耦合迁移室内试验系统	(77)
4.2 质地对土壤热性质的影响	(78)
4.3 热脉冲方法测定土壤热性质初论	(82)
4.4 温差作用下水分扩散系数的数值解	(88)
4.5 温度变化的瞬态和稳态特征	(90)
4.6 温度势梯度对土壤水盐运动的影响	(92)
4.7 小结	(95)
5 覆膜条件下垂直一维蒸发土壤水、盐、热耦合迁移	(96)
5.1 垂直一维覆膜土壤水、盐、热耦合迁移试验系统	(96)
5.2 初始水盐含量均匀的覆膜垂直一维蒸发研究	(98)
5.3 覆膜条件下有限土体垂直一维蒸发研究	(108)
5.4 入渗锋和开孔率不同的半无限垂直一维蒸发研究	(118)

5.5	土壤水分运动问题的数值解	(130)
5.6	小结	(134)
6	覆膜条件下滴灌入渗—蒸发试验研究	(136)
6.1	滴灌三维土壤水、盐、热耦合迁移的室内试验系统	(136)
6.2	非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运动	(137)
6.3	滴灌覆膜开孔蒸发的水分运动	(142)
6.4	覆膜滴灌入渗—蒸发的水盐运动规律	(145)
6.5	小结	(151)
参考文献		(152)
附图 1~4		(165)

1 绪 论

1.1 问题的提出

1.1.1 我国的水资源和盐碱地开发利用现状

1.1.1.1 我国及新疆的水资源利用现状

近代科学的进展,使我们充分了解到土壤水不仅是保证作物丰收的主要条件,而且也是自然界水循环中的一个重要环节。土壤水的运动与转化影响作物的生长和土壤中各种物质迁移和转化过程,因而关系到整个生物圈和人类生存的生态环境。

我国是一个水资源相对紧缺的国家,水资源总量 $2.81 \times 10^{12} \text{m}^3$,居世界第6位;但人均占有量 2317m^3 ,仅为世界人均占有量的四分之一,居世界第109位。由于地区分布极不平衡,水资源与人口和耕地的分布不相适应。我国北方地区水资源不足,海河流域每公顷耕地平均占有水量仅 3960m^3 ,为全国平均值的13.4%。黄河流域和淮河流域每 667m^2 耕地平均占有水量分别为 416m^3 和 444m^3 ,分别是全国平均值的21.25%和22.99%。不仅如此,这些地区的水资源总量中还有一部分是暴雨所形成的洪水不能充分利用。我国是一个农业大国,农业是用水大户,根据水利部水资源公报的统计资料,1997年农业用水量为 $3.920 \times 10^{11} \text{m}^3$,占全国总用水量 $5.566 \times 10^{11} \text{m}^3$ 的70.4%。因此农业节水对解决水资源供需矛盾和保证农业的持续发展具有十分重要的意义。

新疆地处欧亚大陆腹地,干旱少雨,水资源不足。新疆地表水资源为 $8.814 \times 10^{10} \text{m}^3$,扣除流经国外和不能利用的,还有约 $6.447 \times 10^{10} \text{m}^3$,目前已引用量 $4.60 \times 10^{10} \text{m}^3$,占地表水资源的70%以上,达到了最大利用限度。随着经济建设的发展和国民经济建设战略向中西部转移,土地的大开发和农业的大发展,必然使新疆原本水土不平衡的矛盾更加突出。因此,为了缓解水资源短缺的矛盾,新疆维吾尔自治区党委和人民政府从实际情况出发,制定了“开源与节流并举,以节流为主”的水利建设方针,其中节流通常通过节水灌溉方法和灌溉管理去实现。

以上我国和新疆地区的水资源状况表明,农业节水还存在很大潜力。

1.1.1.2 我国及西北地区盐碱地开发利用现状

为适应我国人口增长和国民经济日益发展的需要,必须合理利用和改造有限的土地资源,提高土地利用效率,而盐碱地开发及土壤次生盐碱化的防治是其主要内容之一。

我国盐渍土地面积大,分布广。全国除湘、鄂、赣、云、贵、川外,其余24个省、市、自治区都有分布,从热带到寒温带,从滨海到内陆,从湿润地区到极端干旱的荒漠地区,从海拔-154 m的艾丁湖畔低地到海拔4000 m以上的西藏高原阿里地区,都有盐渍土的分布。

根据最新统计资料,我国有各类盐渍土约 $8.180 \times 10^7 \text{ hm}^2$,还有 $1.733 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 土壤存在着潜在盐渍化的威胁,其中,干旱半干旱的西北地区是盐渍土主要分布地带,总面积约 $1.33 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中已耕地约 $7.34 \times 10^{11} \text{ m}^2$ 为近期治理的重点。如何改造和利用这些土地资源,长期以来一直是我国农业发展的重要任务,也是摆在科研工作者面前的一个严峻的课题。

自然土壤的积盐过程,称为原生盐碱化。耕地土壤由于人为因素造成积盐,使非盐碱土变成盐碱土,或轻盐碱化土变成强盐碱化土和盐土的过程,称为土壤次生盐碱化。西北干旱半干旱的盐碱土属于内陆盐碱土,具有独特的成土条件、积盐过程和分布规律,它既区别于滨海盐土,也与华北和东北的内陆盐碱土不同。概括地说,西北地区盐碱土的分布面广,含盐量高,盐分类型繁多,积盐程度有明显的地带性,盐分的表聚性很强。土壤积盐有自然因素,也有人为因素,尤其是后者造成的次生盐碱化严重影响着生产发展。

西北盐渍土分布区从地域上分为内蒙古高原干旱-半荒漠草原盐渍区,黄河上中游半干旱-半荒漠盐渍区,甘、蒙、新干旱-荒漠盐渍区和青、新极端干旱荒漠盐渍区,包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古各省、自治区,分布面积累计约 $1.333 \times 10^7 \text{ hm}^2$,是我国盐渍土分布面积最多的地域。

内蒙古高原干旱-半荒漠草原盐渍区的盐碱化土壤以苏打盐渍土、草甸构造碱土、草原构造碱土和土壤底层盐渍化为主,此区还有大片底层含盐的具有潜在盐渍化的地带性土壤,在大片沙漠中的沙丘间低平地亦有盐渍土分布。

黄河上中游半干旱-半荒漠盐渍区范围包括陕西、甘肃、青海、内蒙古的一部分和宁夏大部分,处于黄河中、上游,具有多种盐渍过程,硫酸盐累积普遍。渭、泾、洛河流域黄土高原上分布有黄绵土及黑垆土,地层多积聚有碳酸盐和硫酸盐,具有潜在盐渍化的威胁。

甘、蒙、新干旱-荒漠盐渍区的地带性土壤以灰漠土、灰棕漠土、棕漠土和灰钙土为主,土壤不仅类型繁多,而且含盐量重,并以含大量石膏和碳酸镁为其累积特征,除广泛分布以氯化物-硫酸盐为主的现代结壳盐土之外,还有各种类型的其他盐渍化土壤。

青、新极端干旱荒漠盐渍区积盐历史久远,土壤积盐程度甚强,盐渍过程多样,除由地下水引起的积盐过程外,残余积盐和洪积积盐过程以及湖滨盐壳、盐泥的形成也很广泛。

1.1.2 新疆盐碱土形成的特点

1.1.2.1 土壤的原生盐碱化

新疆各地盐碱土的形成过程、盐碱化程度和种类特征差别很大,这与各地的气候、母质、地貌、水文、植被和人为措施等因素有关。

新疆地处欧亚大陆中心,远离海洋,四周为高山环绕,降水稀少,气候极其干旱。天山横穿中部,把新疆分成南北两大盆地,北疆为准噶尔盆地,属温带干旱半荒漠和荒漠气候;南疆为塔里木盆地,属暖温带极端干旱荒漠气候。北疆年降水量 $100 \sim 200 \text{ mm}$,南疆年降水量小于 100 mm ;全疆年蒸发量都在 2000 mm 以上,年蒸发量大于降水量数十倍。根据有关资料,新疆各地干燥度和蒸降比从 $2 \sim 28$ 和 $4 \sim 83$ 不等。由于热量充足,气候干旱,降水量小,蒸发量大,相对湿度低,土层中上升水流远比下降水流大,含盐地下水通过毛细管作用,因蒸发过程使易溶盐聚集于地表,因而平原土体普遍积盐。

新疆成土母质普遍含盐,这些岩石经风化作用,由水流带入盆地,成为盆地盐分的来源。新疆土壤的粉砂含量较高,且多具层状结构,普遍存在厚度不同的黏土夹层,这些黏土夹层影响土壤水盐的垂直运动,其负面的效应就是滞水托盐,影响土壤脱盐和排水。

从地形地貌上说,新疆地貌条件复杂,山前倾斜平原、冲积平原、潜水溢出带、洪积冲积扇对土壤积盐影响很大。另一方面,新疆四周为高山环绕,成为封闭式内陆盆地,地下径流无出路,土壤盐分只能在盆地内迁移,重新分配。

地表水既是盐分搬运的动力,又是平原地区灌溉和地下水补给的主要水源。每年河流从山地把成千上万吨的盐带入平原,其中一部分聚积于土壤,从而直接或间接地影响土壤积盐。

地下水埋深和矿化度对土壤积盐也有影响。地下水埋藏愈浅,蒸发愈强,上升到地表的矿化地下水就愈多,土壤积盐愈快。而埋深相同时矿化度越高,地下水向土壤输送的盐分就越多,土壤积盐就越重。新疆灌区的地下水埋深浅,地下水矿化度最高的达 200~300g/l,为土壤积盐提供了条件。

另外,盐碱地野生植物根系吸水时也吸收了盐分,当其植物残体分解和分泌物散落时,其体内聚积的盐分累积于表土,增加了土壤盐碱化程度。

1.1.2.2 土壤的次生盐碱化

新疆灌区土壤次生盐碱化有两种情况:一种是古老灌溉农业区的次生盐渍化,另一种是新垦灌区的土壤次生盐渍化。

在灌区开荒初期,由于方法不当,在无排水或排水系统不健全情况下进行大面积、大定额的泡荒洗盐,产生了大量的深层渗漏。灌区灌溉初期,土地不平整,田间工程也不配套,实行大水漫灌,很容易产生田间渗漏,引起地下水位升高。另一方面,由于渠系水利用系数很低,一般为 0.2~0.4,渗漏量很可观。此外,平原水库渗漏也会引起地下水位升高,这些因素都使土壤含盐发生变化,引起土壤积盐。

农业技术措施不当也引起土壤次生盐渍化。灌溉土地内微地形起伏不平,受水就会不均,较高处受水少,落干快,土壤淋洗脱盐比周围低平部位差;植物覆盖度较小时,夏季地面温差大,蒸发强烈,会加速土壤积盐;粗放式经营和耕作,如耕翻时漏耕,夏收后未及时复耕,秋收后未及时秋耕,春季未耙地保墒,播前未整平土地,苗期和雨后未及时耙地、破除板结等,都加剧了耕层土壤水分蒸发,造成表土积盐。

另外,长期引用矿化水进行灌溉必然加速土壤的次生盐碱化。新疆垦区范围内的河道几乎皆是沿河灌区的排水通道,承泄上中游排出的地下水、洗盐水和灌溉余水,矿化度比较高。这些回归水流至下游,多数又被引用,加上较强的蒸发强度使矿化度升高,对土壤积盐的影响进一步加剧。

1.1.3 覆膜种植对土壤水分、盐分和温度的影响

覆膜种植是近年来发展起来的新的种植技术,这一技术已在新疆等干旱半干旱地区取得良好效果,并得以大面积推广。总体上说,覆膜种植技术能提高水分利用的有效性,使土壤升温,蓄水保墒,改善土壤物理性状,并能抑制杂草,改善土壤微生物活动,提高肥料

利用率,为作物提供适宜的水、肥、气、热、光等条件从而提高粮食产量。采用该技术不仅能解决干旱-半干旱地区早春农作物缺水 and 地温低等不利因素,而且增加了作物抗旱能力,同时能抑制干旱地区盐碱渍害的发生,确保农业产量的持续稳定增长。

多年生产实践和科学研究结果表明,覆膜种植对水分、温度和盐分有重要影响,概括起来有以下几个方面:

(1)增温作用。覆膜后,由于白天塑料薄膜的透光率很高,太阳辐射的光能透过薄膜直接透射到膜下地面,把光能转化成热能,由于地膜上凝结露珠可以阻隔长波通过,因而使地面升温。同时,地面覆盖对土壤蒸发亦有阻隔作用,能减少蒸发耗能和地面空气流动所带走的热量。多贮存的因乱流或平流送给贴地气层的一部分热量,以及因水分蒸发而带走的一部分潜热被保存下来,并向下层土壤输送。覆膜后不同土层的日平均地温比露地增高 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而且土壤最低温度出现时间比露地滞后 1 h 左右。此外,通过覆膜与其他管理措施配合,可使土壤的有效地积温增多。

(2)保水作用。土壤蒸发过程受能量供给条件、水汽迁移条件以及蒸发介质供水能力的影响。地膜覆盖在土表设置了一层不透气的物理阻隔,使土壤水分垂直蒸发受到直接阻挡,迫使水分做横向蒸发,因而水分向无覆盖处移动,或呈放射性蒸发,使蒸发速度相对减缓,总蒸发量大幅度下降。实践证明,覆膜土壤不像露地那样出现高速蒸发阶段,只以平缓的低速度蒸发,蒸发 16 h 后,覆膜含水量仍然很高,塑料地膜覆盖后,总耗水量减少 $36.9\sim 62.4\text{ mm}$ 。而且地膜覆盖率越大,水分利用效率越高。

(3)抑盐作用。土壤含盐量高时,春季土温回升缓慢且肥力差。盐分随水流动,在地下水位及水矿化度较高的盐碱地中,春季少雨的情况下土壤水大量蒸发使土体上部积累可溶盐而造成危害。地膜覆盖基本阻隔了土壤向大气蒸发的通道,水分循环限于膜下。在这种特定条件下,水分不断在膜面凝聚成水滴后滴入土壤,膜下空气始终保持相当高的湿度,使蒸发受到抑制,从而减少了土壤盐分上升。同时,覆膜土壤含水量比露地高,土壤盐分浓度相对减少,保证作物的正常生长。研究表明,覆膜区 $0\sim 30\text{ cm}$ 深度土壤含盐量比不覆膜的对照区下降 $70\%\sim 80\%$ 左右, HCO_3^- 和 Cl^- 含量也比露地少。

1.1.4 研究覆膜土壤水、盐、热耦合迁移规律有重要意义

水在田间经历着极复杂的循环运动过程。农田水分循环包括降水、植物截留、入渗、土壤水再分布、土壤水向地下水的运动以及土面蒸发、植物水经叶面蒸腾转化为大气水等过程,它既是人类与生态环境的结合部,也是土壤物理学研究的主要内容之一。田间和植物根区运动的土壤水绝大多数都是处于非饱和流动状态,非饱和土壤中的水分是联系地表水与地下水的纽带,是陆地植物赖以生存的源泉。田间入渗过程决定着降雨和灌溉水进入土壤的速度和数量,也决定着地表径流的大小和土壤侵蚀程度的强弱,尤其在水资源短缺情况下,关于入渗的理论和实践是发展节水农业的重要依据之一。土壤再分布过程中水、盐运动的方式也对作物吸收利用养分有很大影响。土壤蒸发不仅影响土壤中水分运动和损失的状况,而且还可能引起土壤盐渍化。

近年来,由于生产和环境保护的需要促进了土壤溶质运移的发展。随着我国国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高,数量巨大的污水、废液和种类繁多的固、液态可

溶物不断地污染地表水和地下水。盐分、养分(包括施入的化学肥料)、农药以及排入土中的污染物中往往含有对生态环境有害的各种重金属元素和化合物。在农村,由于不合理的灌溉,加之过高施用化肥,导致水肥的利用率过低,对农村生态与环境,尤其是水环境造成严重影响。肥料是作物的粮食,掌握作物营养的基本规律,进行合理施肥,在作物增产中有举足轻重的作用。然而,我国化肥使用量由1987年 $1.74 \times 10^7 \text{t}$ 增加到1994年的 $3.31 \times 10^7 \text{t}$,化肥的利用率仅为30%~40%,大部分肥料经不同途径进入地表水和地下水中,导致水体中硝酸盐、亚硝酸盐增加,危害人体健康。洗盐和防止盐分积累,调节和控制土壤水盐以适应作物的要求,土壤养分的保持,提高土壤对作物养分的供应等问题,都是当前生产上的重要问题,也都属于土壤水和溶质运移所研究的范畴。这一系列的生产和环境问题都离不开对溶质迁移及相关问题的研究。

热量作为土壤系统中能量的一种表现形式,通过与外部环境的交换而改变土壤水的能态,从而影响土壤内部物理、化学过程。土壤温度研究的重要性,主要体现在其对土壤水、土壤肥力和农作物生产的影响方面。首先,土壤温度对土壤水的存在形态及运动特征有重要影响。温度对土壤水运动的影响作用归根到底是影响土壤水能量状态、土壤水运动参数以及土壤水的形态。土体内各个方向的温差梯度是引起水(汽)运动的原因之一。土温的高低还影响土壤气体的交换、土壤水和溶质的移动。其次,土温影响土壤中的各种化学反应。一般情况下,化学反应的速度与温度成正相关,温度越高,化学变化越强烈。土温还影响土壤有机质和氮素的积累。

多年来,西北地区采用大的灌溉定额,进行大水漫灌、结合排水系统冲洗改良盐碱地。这一方法虽然起到了不可忽视的作用,但也带来了不少问题。西北地区的灌溉定额普遍偏高,例如在塔里木河流域极度缺水的干流区,棉花灌溉定额高达 $2.69 \sim 2.99 \text{ m}$,即使在盐渍土开发利用号称上乘的宁蒙河套灌区,亩均灌溉水量亦在 $1.80 \sim 2.49 \text{ m}$,使灌区成为蓄存黄河水的地下水库,地下水位长期稳定在临界深度以上。由于管理不善,地下水位上升,造成了土地大面积次生盐渍化。在新疆,由于土地资源丰富,大量次生盐渍化的土地废弃,不再种植作物,同时强烈蒸发使地表积盐越来越多,最终导致这一部分土地无法再利用,造成土地资源的浪费。另一方面,西北地区为干旱半干旱的缺水地区,其粗放的灌溉方式导致输水过程中严重的渠系渗漏,水的利用效率很低。

地膜覆盖栽培技术是近年来发展起来的一种新的种植技术,据新疆2001年底的统计,新疆覆膜种植面积达 $1.38 \times 10^{10} \text{ m}^2$,其中各种覆膜灌溉面积为 $6.71 \times 10^9 \text{ m}^2$ 。

在综合考虑水资源缺乏和生态环境等问题的基础上,将先进的节水灌溉技术与覆膜种植技术有机结合,形成既节水又可开发利用盐碱地和防治次生盐碱化的新方法——覆膜灌溉。覆膜灌溉包括膜孔灌溉、膜下滴灌、膜侧灌等多种形式。近年来农八师与西安理工大学水资源所合作对覆膜条件下土壤水盐运动的特性进行研究,表明膜孔灌及膜下滴灌对我国干旱-半干旱地区利用水资源与环境保护问题有很大的社会和经济意义。经西安理工大学水资源研究所与新疆石河子炮台实验站几年的合作,根据农八师121团 $4.002 \times 10^3 \text{ m}^2$ 盐荒地利用膜下滴灌技术开发盐碱地的实验,三年亩产皮棉达140 kg,总盐含量在2.5%的盐土,两年单产皮棉达70 kg。又如136团 $4.002 \times 10^6 \text{ m}^2$ 轻盐化荒地,头年采用膜下滴灌后,单产皮棉80 kg。这表明膜下滴灌技术在开发利用盐碱地方面有很大的潜

力,创造的农业生产效益是可观的。但就膜下滴灌技术来说,该技术应用于农业种植、节水灌溉和盐碱地开发利用方面,其理论和实践中还有诸多的问题亟待解决。

总体上说,目前国内外对覆膜条件下水、盐、热耦合迁移的机制还研究得不够完善,有必要进一步进行系统研究。覆膜增温这一特点使得温度场对水盐运动的影响成为一个不可忽略的重要研究课题。在覆膜地温的特征方面,农业上已做了部分研究,但侧重点不同。分析覆膜后特征、较系统的研究覆膜地温的规律等都是进一步研究温度场对土壤水盐运动影响的重要前提,其合理研究成果对于指导覆膜种植的生产实践具有重要的理论价值。除温度规律以外,覆膜条件下温度场的存在对水盐运动的影响方面研究内容甚少。覆膜后在特定温度场条件下土壤水盐运动的方式和规律也需要进行系统研究,尤其在不同的水分循环过程中,由于上边界覆膜条件的不同会导致温度场中水盐运动方式的改变,因此,研究覆膜条件下水、盐、热耦合过程是极其必要的。

1.1.5 覆膜种植技术的发展前景

覆膜种植作为一种新的节水抑盐方式应用于农田中,其增产效果已经实验证实,虽然目前还未大面积推广,但基于独特的思路和其优点,在未来的一定时期内必将开拓出一个广阔的市场,具有良好的发展势头和应用前景。

近年来,随着多种类型薄膜覆盖材料(如光降解地膜、裂缝薄膜、有孔薄膜、有色膜等)的开发,薄形高强度地膜的出现,加之地膜价格的降低,使得单位面积地膜成本相应降低,地膜覆盖栽培技术已逐渐被大量用于大田作物。

就西北地区 and 新疆来说,灌溉是作物获得水分和吸收养分的必要方式。在水资源短缺,盐渍土分布面积大、范围广,气候炎热干燥、蒸发量大以及土地多、人口相对少、劳动力价值高的现实条件下,覆膜灌溉对节省水量和改良与开发盐渍土所具有的优势,为西北地区甚至全国大范围内广泛分布的盐渍土开发利用提供了一个行之有效的对策,它将会有一个很好的发展前景。

1.2 国内外研究现状

土壤水、盐、热耦合迁移的过程实际上是溶质随水分迁移、温度与水的相互作用或者水分、溶质、温度之间相互影响的过程,因此溶质的迁移转化和温度势梯度对水分运动的影响都是在水分运动基础上进行的。目前国内外对土壤水分的研究已较成熟,但对溶质和热迁移的研究方面还在不断完善之中。其中滴灌条件下水盐运动是近些年研究溶质迁移的一个方向,覆盖条件下水热迁移的研究是目前研究土壤热理论的内容之一;土壤水、盐、热耦合过程也是土壤物理研究的重要内容。

1.2.1 土壤水和溶质迁移研究进展

大量示踪实验表明,田间非饱和带水流和溶质迁移过程相当复杂。优先流的存在形成了复杂的体系,土壤空间变异性和区域土壤饱和程度反映了土壤的非均匀程度。由于田间溶质运移的复杂性,研究者们针对不同尺度条件来研究溶质迁移过程,近年来溶质运移理

论和实验研究进展详述如下。

1.2.1.1 一维土壤中水和溶质迁移

(1) 模型研究

传统的对流-弥散模型(简称 CDE 方程)是以溶质运动的物理机制(对流和水动力弥散)为基础,根据质量守恒定律推导出来的,其综合表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\theta C + \rho C_s + (P - \theta)C_g] = \frac{\partial}{\partial x_j}[\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} + (P - \theta)D_{gij} \frac{\partial C_g}{\partial x_j}] - \frac{\partial(q_i C)}{\partial x_i} + \sum_k \Phi_k \quad (1-1)$$

式中, ρ 为土壤容重; P 为总孔隙度; C_i 为溶质在固相中的浓度; C_g 为溶质在气相中的浓度; D_g 为溶质在气相中的扩散系数; Φ 为源汇项; θ 为体积含水率。CDE 方程求解很复杂,在极理想条件下可求得解析解,大量采用的是一些数值方法,如差分法、有限元法、特征线法等。

由于田间孔隙的非均匀性,1964 年 Coats-Smith 提出了动水-不动水模型,也称两区模型。在这一模型中,假设对流弥散过程只在动水区发生,吸附解析和降解作用只发生在不动水区,其速率不一定相同,扩散作用是联系两区之间溶质交换的纽带。在包含可动水体和不动水体的土壤中,稳定一维非饱和和流惰性非吸附性溶质迁移可用下式表达:

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - q \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (1-2a)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (1-2b)$$

式中, θ_m 为可动水含水量; θ_{im} 为不动水含水量, $\theta_{im} = \theta(1 - C/C_0)$; C_m 、 C_{im} 分别为可动和不动区溶质浓度; D_m 为可动区弥散系数; α 为溶质交换系数; q 为 Darcy 通量密度; t 为时间; x 为深度。

对两区模型的研究中, Jaynes 提出利用张力入渗仪和一系列惰性非吸附性溶质随时间的入渗,来确定非饱和土壤中动水区和不动水区之间不动水比例和溶质交换系数的大田方法。但在该研究中,采用的假定与实际的模型不符。Jaynes and Shao 提出了两区模型中估计可动水比例和溶质迁移系数的改进方法。

邵明安等通过对 CDE 方程的研究,结合边界层理论,提出了确定 CDE 方程中参数的边界层模型,通过对农业污染物在多孔介质迁移过程中浓度锋面的描述和概化,得到:

$$d(t) = \frac{2vt}{R} + \sqrt{\left(\frac{2vt}{R}\right)^2 + \frac{12Dt}{R}} \quad (1-3)$$

式中, $d(t)$ 表示 t 时间溶质锋的位置, D 是水动力弥散系数, R 是延迟因子, v 是平均孔隙流速。边界层理论克服了现有方法耗时、参数值不唯一等缺陷,为利用对流弥散理论研究田间土壤溶质迁移过程提供了有效手段。

Strecker 提出了平行土柱模型(PSC),也称流管模型, PSC 模型提供了一种模拟溶质在非均质土壤中迁移的简单方式。田间土壤水流速的复杂性使可靠预测非均质土壤溶质迁移难度很大。但很多情况下,迁移面积大小和有关参数的相关长度比迁移距离大得多,因而可以忽略横向弥散,这时可以适用 PSC 模型。

Jacques 假定溶质为对流弥散或随机对流过程,用时间序列的矩法估计滞留浓度及参数。将田间尺度下每一深度的局部溶质穿透曲线(简称为 BTC)平均得到滞留溶质浓度时间序列 C_r (稳定流):

$$\langle C^r(z,t) \rangle = \left[\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n \theta(z,x,t) C^r(z,x,t) \right] / \langle \theta(z,t) \rangle \quad (1-4)$$

式中, $\langle C^r(z,t) \rangle$ 为平均滞留浓度; $C^r(z,x,t)$ 和 $\theta(z,x,t)$ 分别为水相滞留浓度和含水量。模型中考虑了土壤含水量的空间变异性。Jacques 进行田间尺度实验,用水平安装的 TDR 探头测定了稳定流条件下两种田间土壤的溶质迁移,用这种装置得到滞留浓度穿透曲线。

王全九根据土壤溶质运移特点,结合土壤水分研究成果,推求了描述土壤溶质迁移过程的毛管束模型。这一模型从几何角度研究土壤溶质迁移,克服了 Taloy(1953)模型中最小穿透时间对于任何土壤都相同的缺点,使模型更合理。模型将 N 与相对不同水体形成了一种函数关系。模型中所有参数仅与 BTC 有关,说明溶质在土壤中的运动是土壤特性的另一种表现形式。但由于模型对土壤孔隙分布的特点概化的过于简单,因而其预测值不能很好地符合实际情况。

传统的土壤水和溶质迁移原理建立在确定性方程和质量守恒基础上,大量研究表明其对均匀条件下物质迁移特性描述的相当精确,但用于田间条件下的结果并不尽人意。为此许多研究者不再试图对物质迁移进行精确地细化,而提出了侧向和垂向变异很大条件下溶质运移的近似方法,即传递函数模型。在这一模型中,对田间土壤的内在机制可以不了解,其特点是完全根据将地表加入的浓度输入函数转化成田间土壤中运移溶质浓度的函数。传递函数最简单的形式是 Box-Jenkins 于 1976 年提出的单变量函数。Jury 用传递函数模拟了溶质迁移过程。在随机模型中,地表均匀注入的溶质随水运移的特性用概率处理,假设溶质从地表向任意深度运移特性只与灌水量有关,没有弥散发生。Box-Jenkins 给出输入函数不同时的几种解析解,模型计算表明,任何影响田间速度变异的物理机制导致的穿透时间分布会引起极大的变异。

Rooij 提出与指流有关的流动模式中可以区分为三个水流特征明显不同的区,利用流体力学和相关的几何理论,推导了分布区与指流区界面溶质穿透曲线。三区解析模型给出了表层斥水土壤在发生指流时流动的定量描述。这一模型可以计算无扩散惰性溶质的穿透曲线,能对每个区影响 BTC 的方式作出定量评价,也可以对强烈影响溶质淋洗的土壤和水流特性进行验证,这一模型还可以对更细致的数值模拟提供资料。但模型中假设分布区和指流区是饱和的,实际上其含水量远低于饱和含水量;另外模型计算表明溶质淋洗对可湿润土壤的厚度有较高的敏感性,说明指流的长度和地下水深度都对溶质淋洗有显著影响;同时这一模型只能处理地下水位不变的情况;由于指流发生的位置和发生深度事先无法知道,对这一模型的田间适用性很难检验。

(2) 实验研究

小尺度下土壤溶质浓度变化很大,而且影响大尺度溶质迁移特性,在很多情况下研究小尺度溶质运移可以更好地理解大尺度溶质运移特性。微模型的应用是模拟水流和溶质微观运移过程的新方法。Biggar 等用 Cl^{36} 作为示踪剂进行了 390 μm 玻璃珠充填短柱中,

两种流速下不同浓度 NaCl 溶液置换实验,结果表明惰性介质混合置换中离子扩散特性与浓度有关,不稳定流的黏滞度和稠度对扩散系数特性的影响比浓度大。Corapcioglu 等用示踪剂对多孔介质孔隙尺度易混合流体的溶质迁移进行了微模型可视化和定量化研究,通过摄录的图像得出了溶质锋浓度等值线图,确定了微模型孔隙度和导水率,得出了纵向弥散度的表示方法。CaO 等对孔隙尺度惰性非吸附性溶质淋洗过程运用有限元方法进行了模拟,对浓度缓慢变化时的浓度平均值、方差、变异系数和反应率进行计算,得出了变异系数和反应率之间的关系并将淋洗程度定量化。Haga 在稳定非饱和条件下进行了示踪实验,得出了水饱和度与 Peclet 数之间的关系式,测定了临界水饱和度,实验分析表明水动力弥散系数随水饱和度的增加而增加。

许多学者对不同质地的原状土和扰动土溶质迁移进行了实验室土柱尺度研究。国内外 20 世纪 80 年代多限于对某一初始和边界条件下均质土溶质运移的定性和定量研究,得出室内溶质运移的有关参数,对影响溶质运动的诸多因素进行分析,或对特定实验下的溶质穿透曲线进行分析,采用的模型多为传统的对流—弥散型方程。学者们提出了水盐运移参数的不同求解方法,在溶质运动的研究中考虑了化学过程以及土壤中多组分相互作用的影响,并提出了考虑不动水体存在时的两区模型。

入渗中的水盐运动规律已有了较充分的研究,本文不再赘述。就蒸发来说,按照外界温度条件,可分为等温和非等温两类,后者涉及土体温度梯度的影响。等温条件下的蒸发研究与田间情况相差较大,而且侧重于机理方面。实际上多数情况下土体温度梯度是导致水盐迁移的主要原因。Dahiya 进行三种质地初始含水量和干土土柱实验,认为在砂土和砂壤土中,低灌水量情况下氯化物淋洗效果更好且更深,初始连续积水淋洗时土壤表层在蒸发时有积盐现象,蒸发过程中黏土几乎无盐分上行,另外盐锋的推进与初始含水量有关。李韵珠等对蒸发条件下黏土层与土壤水盐运移规律做了人工土柱和田间自然土柱实验研究,重点探讨了黏土层的层位与厚薄对土壤水分上行和盐分积累的关系。刘亚平对定水位稳定蒸发条件下均质沙壤土水盐运动的室内垂直土柱实验研究,用 Bresler 计算格式进行垂直一维情况下盐分运动的数值模拟,利用反求参数法确定盐分扩散系数。研究结果表明,土壤初始含盐量、蒸发强度、潜水位埋深、地下水矿化度、蒸发时间、潜水蒸发量等条件对土壤积盐有不同程度的影响。Meng 采用土柱实验研究了蒸发和入渗过程中土壤剖面离子组成的变化。在蒸发条件下,地下淡水中向上运动的离子主要是 Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Na^+ 。在降雨入渗条件下,盐分淋洗主要发生于地表。当总盐含量降低时, NO_3^- 和 Cl^- 含量降低很快, SO_4^{2-} 降低慢,而 HCO_3^- 变化很小。对阳离子来说, Na^+ 和 Ca^{2+} 以相同的速率降低, Mg^{2+} 降低很慢。杨文治分析了黄土高原不同湿度和不同质地土壤的水分蒸发性能和移动规律,并探讨了温度梯度与土壤蒸发的关系但未做深层研究。邵明安分析了滞后作用对蒸发过程的影响,认为滞后作用对土壤蒸发有促进作用,它阻止入渗水量向深层运动,表层含水率相对提高,蒸发速率加快。

目前人们对单纯再分布条件下水和溶质迁移的研究还很少。相对来说,再分布条件下水分的研究多于溶质研究。Gardner 采用 γ 射线法测定灌溉后再分布过程中土体含水率变化,推导了非饱和流方程的近似解,得出初始湿润层水量变化是时间的函数。Mingan Shao 用广义相似理论得出了水平方向水分再分布的精确解,此方法允许进水边界含水量

随时间变化及初始含水量下 D 值不为零,它发展了传统的 Boltzmann 变换理论,而且简化了现有方法的测定程序。Poulovassilis 研究了初始含水率对入渗后水分再分布的影响。Burns 建立了休闲地在过度降雨和蒸发后盐分再分布的模型,包括盐分向下淋洗和离子向地表毛管上升两部分。

此外,部分学者研究了边界条件对溶质运移的影响,以及水与溶质的相互作用。

1.2.1.2 滴灌条件下水和溶质的迁移

对滴灌条件下水分运动的研究多于盐分的,而且目前已经提出了几种较为成熟的模型。国内外学者针对不同的初始和边界条件,对 Richards 方程进行简化和转化,总结出了如下几种模型:Brandt 平面流模型,Brandt 圆柱流模型,三维轴对称点源入渗无量纲模型,等效半球模型和三维 Green-Ampt 入渗模型。缴锡云归纳了点源入渗问题求解方法。滴灌与三维水和溶质迁移的定量研究涉及解析解和数值解法。本节综述近年来滴灌条件下水盐运移理论与实验研究的一些成果。

采用基尔霍夫变换(Kirchhoff)定义基质势通量 φ ,而导水率 K 表示为指数形式:

$$\varphi = \int_{-\infty}^h K(h)dh = K/\alpha, K(h) = K_0 \exp(\alpha h) \quad (1-5)$$

假定 $d\theta/d\varphi$ 为常数,则非线性水流运动方程变为线性形式:

$$\partial\varphi/\partial t = (\kappa/\alpha)\Delta^2\varphi - \kappa(\partial\varphi/\partial z) \quad (1-6)$$

式中, $d\theta/d\varphi = \alpha/k$, $k = dK/d\theta$ 。

在研究滴灌或高频灌溉时,稳定状态下 θ 或 φ 在小范围内变化情况下,线性化形式非常有用。Warrick 用线性化形式水分运动方程,结合前人研究成果,得到了与时间有关的稳定状态点源水分运动方程,并用数值方法模拟了入渗期间湿润锋推进、滴灌模拟循环输入的水分变化以及两源基质速度势问题。Philip 给出了各向同性和各向异性均质土中形数比任意的类球体穴准线性稳定入渗的解。Pullian 对半无限多孔介质中任意深度的二维和三维稳定准线性地理点源和地表点源采用边界元方法进行数值模拟,用大量图形说明了环穴表面形状对通量与有效湿润区半径的影响。

滴灌入渗条件下水盐运移的定性研究主要针对水和溶质迁移的影响因素和一些应用于田间的实验评价。Papadopoulos 对含硫化物水滴灌灌溉下盐渍化的形成与盐分剖面分布进行田间实验,认为土壤盐渍化形成的时间、深度和距滴头的侧向距离在灌溉季节受水分分布的影响,而在冬天则受淋洗作用的影响。Khan 用重量分析法对点源水分和溶质分布进行田间测量,分析不同的灌水率、配水体积和输入浓度对水分和溶质分布的影响。在灌水率和湿润区形状间有明确关系,灌水量不变时,增加灌水率则水平湿润面积增加而湿润深度减小。输入浓度,配水体积和灌水率加大时,溶质浓度增加到与含水量相同的深度和径向距离。Clothier 研究了滴灌施肥灌溉条件下的氮素运移,提出了非稳定三维不饱和土壤中水和氮素运移的近似原理,并与室内填装的粉沙壤土实验测定结果进行比较。将远离滴头的径向含水率剖面及其持续时间用准线性解表示,确定了地表滴灌灌溉和再分布期间的瞬变含水率剖面和对流溶质锋位置,用氨线性等温吸附对滞留运移做了探讨。Kachanoski 运用垂直安装的 TDR 设计了田间快速测定点源溶质垂直通量的定位方法并进行测试,提出了估计溶质弥散度的方法。Ward 用 TDR 进行测定,分析了远离地表点源

的三维轴对称水和溶质迁移规律,并对 Ratts(1971)等人提出的三维水和溶质迁移原理进行验证。Jaramillo 采用充有示踪剂的张力圆盘入渗仪测定压力水头在 $-100 \sim 0$ 之间变化时田间砂石土壤的导水率和吸附力以及可动含水量比例。用累积入渗三维瞬变流分析得到导水特性。可动水含量是平均孔隙大小的函数。当供水水压降低时,平均孔隙直径增加则平均可动水含量也趋于增加,这是缘于土壤在近饱和状态时表现出双峰水力特性。

滴灌再分布中水盐运动规律研究甚少。Clothier 根据几何特性研究了滴灌三维水分和溶质入渗和再分布规律。点源附近含水量入渗剖面在再分布期间很快降低到接近常数,其原因归结于再分布期间毛管力比重力的影响大。含水量的这一分布特性使得再分布停止后的对流锋位置易于确定。陈渠昌等研究了不同的滴头流量、不同灌水历时条件下滴灌湿润体大小与形状的观察和湿润锋运移情况。

目前国内外对滴灌蒸发中的水盐运动的研究还研究较少。

1.2.2 土壤水热耦合运移研究现状

土壤中的水分运移与热量传输是两个相互作用的过程,即所谓水热耦合过程。关于土壤水热耦合运移,有两种独立的分析方法,一是 Philip 和 de Vries (1957)基于多孔介质中液态水黏性流动和水汽扩散理论及热量平衡原理,提出了水热耦合下土壤水分运移与热量传输基本方程,即所谓机理法;二是基于不可逆过程热力学原理提出的描述土壤水热通量的方程式,即所谓热力学法。虽然这两种方法出自于不同的观点,但它们互为关联,可融于一个等价模型。相比之下,由于机理法概念更为明确、清晰,在土壤水动力学领域,多用该法描述土壤的水热运移。

1.2.2.1 控制方程

非饱和土壤中水热运动规律可以用一组偏微分方程来表达。土壤的温度可用导热方程来表达:

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta \cdot (\lambda \Delta T) \quad (1-7)$$

Philip 与 de Vries (1957)提出了土壤水热耦合运动的扩散型方程组,并在研究均质土壤的蒸发过程中被广泛采用。杨邦杰(1998)对该方程加以修正,其表达式为:

$$C_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \Delta \cdot [(K + K_v) \Delta \psi] + \Delta \cdot (D_{TV} \Delta T) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (1-8)$$

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta \cdot [\lambda \Delta T] + \rho_L L \Delta \cdot (K_v \Delta \psi) \quad (1-9)$$

式中, D_{TV} 为土壤水汽在温度梯度下的扩散率; D_v 为土壤水汽在水分梯度下的扩散率; ρ_L 为液态水密度; L 为蒸发潜热; K_v 为水汽在基质势 ψ 梯度下的当量导水率。

1.2.2.2 热参数的研究

土壤热传递的方式不仅决定于进入土体的热能数量,而且与土壤本身的热学性质有关,土壤热性质是决定土壤热状况的内在原因。在研究土壤热和温度变化规律以及调节土壤热状况时必须先掌握土壤的热性质,尤其当土壤含盐时其热性质与盐溶液浓度的关系也是土壤热特性研究的一个主要内容。