

灌溉对土壤盐分的影响及微咸水利用的模拟研究

乔玉辉, 宇振荣

(中国农业大学资源环境学院, 北京 100094)

摘要:在土地利用分析模型 PS123 的基础上,以土壤盐分主要影响作物水分吸收为突破口,将盐分对作物生长的影响结合到模型中,以使模型更加适合于盐渍化土地和微咸水灌溉的使用。并运用田间试验对模型进行了验证,模拟结果较好。利用模型对微咸水不同的灌溉方案对土壤盐分的影响进行分析,提出了合理的灌溉方案。盐渍化地区地下水位埋深应控制在 2.0~2.5m 以下,微咸水灌溉宜采用少次多量的措施进行较大定额灌溉,且不能连续灌溉。

关键词:土壤盐分;微咸水灌溉;模拟

Simulation study on the effects of irrigation on soil salt and saline water exploration

QIAO Yu-Hui, YU Zhen-Rong (China Agricultural University, College of Agricultural Resource and Environment, Beijing 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2050~2056.

Abstract:Based on the land use analysis model of PS123, the simulation of soil salts effects on crop growth is integrated in PS123 model considering osmotic stress of the salt effects on water uptake and production. This salt integrated crop model is more suitable to be used in salinity land and water irrigation simulation. This model is calibrated with field experiments conducted at Hebei Quzhou Experimental Station of China Agricultural University. But there are still some problems to be solved such as the simulation of soil evaporation in the early growth stage of winter wheat. The model should be further developed.

With this model, the feasibility and risk of long-term irrigation with saline water can be evaluated and analyzed. The optimum irrigation scenarios are proposed. The threshold groundwater table of accumulating salt in soil is about 2.0~2.5 meters, the water should be kept under 2 meters to prevent soil salt accumulation in salinity area. If the water table is exceeded the threshold ground water table, engineering measurements should be taken to control the water table.

The slight saline water can be used to solve the problems of water shortage. The principle should be to irrigate less times and with large amount of saline water of 70~90mm each time. Such measurements

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011709);荷兰 SAIL 基金会的中荷合作资助项目(SAIL-SPP 299.399)

收稿日期:2002-03-15; **修订日期:**2002-10-20

作者简介:乔玉辉(1970~),女,山东青岛人,博士,副教授,主要从事土地利用及有机农业研究, E-mail: qiaoyh@cau.edu.cn

Foundation item:National Key Research and Development Program(No. G1999011709); Sino-Dutch Program Funded by Netherlands SAIL Foundation(SAIL-SPP 299.399)

Received date:2002-03-15; **Accepted date:**2002-10-20

Biography:QIAO Yu-Gui, Ph. D., Associate professor, main research field: land use analysis and organic agricultural development.

can reduce the salt accumulation in soil and harm for the crops. With the modeling, the results show that the saline water can be used in the late period of the growth stage, but it cannot be irrigated continuously. The best way to use the saline water is with the rotation or mixture of fresh water. Before seeding period of winter wheat or maize, a large amount of fresh water should be irrigated to leach the soil salt in the root layer to reduce the harm of crop roots.

Key words: soil salt; saline water irrigation; simulation

文章编号:1000-0933(2003)10-2050-07 中图分类号:S152,S181 文献标识码:A

黄淮海平原地区的土地盐渍化由来已久,经多年改造已有改观,但仍存在一定面积的盐渍化土地。黄淮海平原同时也是我国重要的粮食产区,该地区农业用水量较大,随着用水量的增加,这一地区淡水资源承受着巨大压力;而地区地下浅层存在着大量的咸水资源^[1],这部分水资源也是该地区发展农业生产的重要资源基础。因此如何利用好这部分水资源是学者们重要的研究课题。以前的研究中多采用田间试验等一些经验性方法来评价咸水质量和灌水利用效果^[2~4],一般田间试验最多进行四五年,而对咸水资源对作物和土壤影响的长期效应缺乏可靠的证据和资料,因此使咸水资源的开发利用受到限制。本文将尝试将土壤盐分对作物生长的影响结合到土壤水分模型中,通过模型来评价咸水灌溉的长期生态环境效应。

作物生长模型 PS123 由 Drissen 和 Konijn^[5]提出并加以描述,并进行了不断的修改和验证^[6,7]。PS123 模型包括光温生产潜力模型、水分限制下的生产力模型以及达到目标产量下的养分需要量计算。本文在此模型基础上将盐分对作物生长的影响结合到模型中,以使模型更加适合于盐渍化土地和微咸水灌溉的使用。

1 材料与方法

1.1 研究地自然状况

试验设在中国农业大学河北省曲周试验站,本试验区土壤为粉砂壤土,中等肥力,有机质含量 10.2g/kg;全氮量 0.77 g/kg,碱解氮 50 mg/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 本试验区自“七五”攻关课题以来每年都布置冬小麦品种、密度、播期试验,1997 到 2000 年又加入冬小麦灌溉试验。通过试验所得的田间资料来修正 PS123 作物生长模型^[6,7]。在 1998~1999 年的灌溉试验中加入微咸水,研究盐分对作物和土壤的影响。试验中施肥、锄草及控制病虫害等措施使冬小麦生长条件处于最适。试验设计见表 1。

表 1 1998~1999 冬小麦水分处理灌水(mm)方案

Table 1 Water treatment experiment scenario of winter wheat in 1998~1999(irrigation amount; mm)

处理 Treatment	1998-11-6	1998-12-7	1999-03-13	1999-04-8	1999-05-5	灌水总量 Total
淡水充足 Sufficient fresh water	42 淡/fresh	42 淡/fresh	69 淡/fresh	83 淡/fresh	55 淡/fresh	291 淡/fresh
咸水充足 Sufficient saline water	0	83 淡/fresh	0	83 淡/fresh	0	166 淡/fresh
关键淡水 Key fresh water	42 淡/fresh	42 淡/fresh	69 咸/saline	83 咸/saline	55 咸/saline	84 淡/fresh; 207 咸/saline

1.2.2 观测项目 在冬小麦生长的过程中,对土壤水分和盐分进行了观测。土壤水分每 7d 观测 1 次,灌溉前后及大雨后加测。调查方法为用中子仪测定土壤水分,层次为 20cm、40cm、60cm、80cm、100cm、120cm、160cm、200cm,用 TDR 测定土壤表层水分(0~30cm)。土壤盐分每隔 14d 取一次土壤提取液,用电导率仪测定电导率,如取不出土壤溶液,则需取该层土壤风干后用 1:5 土水比浸提后测电导率,溶液提取器安装层次为 20cm、40cm、60cm、80cm、100cm、140cm、180cm。

1.3 土壤盐分与水分结合模型

土壤水分丰缺是限制盐渍化土壤上作物生长的重要因素。当土壤盐分与缺水干旱并存时,作物经常受

到水分和盐分两种胁迫,而土壤水分充足时,能显著提高作物耐盐性。在作物生长过程中,由于蒸发蒸腾而引起土壤水分损失,导致含盐量升高,使作物易受到盐分的渗透胁迫及离子毒害,土壤水分减少,造成土壤溶液渗透势(OP)提高,降低土壤与植株间的水势差,从而削弱植物的水分吸收。因此即使土壤中仅有少量盐分,也会导致萎蔫点以上的土壤水分有一部分不能为植物所利用,从而使植物吸收利用的有效水分范围降低。

盐分对作物生长影响模型的建立主要依据渗透理论,土壤溶液含盐量增高,降低了土壤中的渗透势,使土壤总水势减小,使作物从土壤中吸水困难。本文以此为切入点,土壤盐分主要影响作物水分吸收为突破口,通过改变作物的相对蒸腾速率($CFWATER$)来模拟土壤水盐运动对作物生长的影响。此模型可对作物生长的全过程所受盐分的影响进行模拟。

根据土体盐分平衡原理来模拟土体盐分变化状况,根区内盐分总量为:

$$\text{soilSALT} = \text{saltSURFACE} + \text{saltDEEP} + \text{saltIRRIG} - \text{saltPERCED} + \text{saltRISEN} \quad (1)$$

saltSURFACE 为最初土壤中的含盐量 saltRISEN 为毛管上升而带入的盐量

soilSALT 为根区内盐分总量 saltPERCED 为盐分淋失量

saltDEEP 为根系生长而增加的土壤含盐量 salt IRRIG 为灌溉增加的盐量

各分项计算如下:

$$\text{saltPERCED} = D \times DT \times (EC(\text{day})/1.464) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{saltRISEN} = CR \times DT \times (EC_w/1.464) \times 100 \quad (3)$$

$$\text{saltIRRIG} = IE \times DT \times (EC_i/1.464) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{saltSURFACE} = (SMPSI/BD) \times (\text{oldRD} \times EC(\text{day}))/1.464 \times 100 \quad (5)$$

$$\text{saltDEEP} = (SMPSI/BD) \times (RD - \text{oldRD}) \times (EC(\text{day}-1)/1.464) \times 100 \quad (6)$$

式中, $EC(\text{day})$ 是模拟当天土壤溶液含盐量(ms/cm); DT 是时间间隔(d); D 是从根层下边界到地下水渗漏速率(cm/d); CR 为水分毛管上升量; EC_w 是地下水的含盐量(ms/cm); IE 为有效灌溉速率(cm/d); EC_i 是灌溉水含盐量(ms/cm); $SMPSI$ 为土壤的含水量(cm^3/cm^3); BD 是土壤容重(g/cm^3); RD 为等效根深。

$$\text{土壤含盐量}(EC \text{ 值}) \text{ 的计算: } EC(\text{day}) = (\text{soilSALT} / ((SMPSI/BD) \times RD \times 100)) \times 1.464 \quad (7)$$

由灌溉带入土体中的盐量由式(4)计算,但并不是所有的灌溉水都进入土壤,一部分可能由土壤表层径流带走。这里并不考虑由于灌溉水的蒸发带来的影响,因为水分蒸发后盐分仍留在土体中,进入土体的灌溉水同时也将盐分带入。

根据土壤可能存在径流,则做如下考虑:如果 $(IE(\text{day}) + SS/Dt) > IM$;则

$$\text{saltIRRIG} = (IM - SS/DT) \times DT \times EC_i/1.464 \times 100 \quad (8)$$

否则,就采用(4)式,其中 IM 为实际入渗速率(cm/d); SS 是实际地表蓄水量(cm)。

在不存在离子毒害的情况下,植物生长减少量与根区土壤溶液渗透压有关,Thorne & Peterson 给出了可溶性盐所造成的冰点温度变化($DELFRPNT \text{ } ^\circ\text{C}$)与渗透势(大气压) OP 之间的关系^[12]:

$$OP = 12.06 \times DELFRPNT - 0.21 \times DELFRPNT^2 \quad (9)$$

在物理化学手册^[13]中又给出了可溶性盐(NaCl 、 Na_2SO_4)的电导率(EC)与冰点温度的关系:

$$EC = 28.26 \times DELFRPNT - 2.33 \times DELFRPNT^2 \quad (10)$$

综合以上两个公式, EC 与 OP 之间的关系为:

$$OP = 463 \times EC \quad (11)$$

电导率 $EC(\text{ds/m})$ 与含盐量 $C0(\text{g/L})$ 之间关系为:

$$EC = 1.464 \times C0 \quad (12)$$

1.4 盐分对作物生物量的响应模型

作物生长与根区土壤水盐状况密切相关,作物产量与土壤含盐量也存在着一一定的响应函数。国内外众多学者依据大量的实验数据进行统计,建立不同盐渍化水平下与作物产量间的相互关系,美国盐碱土实验

室在这方面进行了大量研究^[8],总结了 30a 的试验资料 61 种作物的耐盐度数据,用已知的由于土壤盐渍化程度不同而减少的产量与非盐渍化条件的产量进行对比来表示,虽然农作物绝对耐盐力随着气候、栽培方法和其他条件的不同而变化,但相对耐盐力适应于多数条件。因此仅考虑土壤根层可溶盐总量与作物产量的相互关系,可以用下列公式表示: $Y = 100 \times (EC_0 - EC_e) / (EC_0 - EC_{100})$ (13)

Y 为产量相对减少量(%); EC_0 产量为 0 时的盐渍度(ms/cm); EC_{100} 不影响作物产量的最高盐浓度(盐分临界值)(ms/cm); EC_e 饱和土壤浸出液电导率(ms/cm)。

根据研究结果绘制了谷类作物、纤维、油料作物、豆科饲料作物、蔬菜和果类的相对产量随盐度的变化曲线,从中可以得到给定作物的 EC_{100} 和 EC_0 值,从所提供的数据来看,对于小麦来讲 EC_{100} 为 6.5ms/cm, EC_0 取 22ms/cm。

同样作物产量相对减少量 Y (%) 与土壤盐分的关系可以用下列方程表示:

$$Y = \begin{cases} 0 & 0 < EC_e \leq EC_{100} \\ 100(EC_0 - EC_e) / (EC_0 - EC_{100}) & EC_{100} \leq EC_e \leq EC_0 \\ 100 & EC_0 < EC_e \end{cases} \quad (14)$$

本模型在考虑盐分对作物生长影响时主要以渗透理论为主,但同时也结合产量对土壤盐分的响应模型,对保证产量的上下限做一规定;因为当土壤溶液浓度超出一定范围时,在提高渗透势的同时,也会产生离子毒害,当土壤含盐量 $< EC_{100}$ 时,则作物不受盐分影响,可以不考虑盐分的作用;当 $EC_{100} < EC < EC_0$ 时,土壤盐分主要通过影响土壤渗透势而抑制作物根系吸水,从而影响作物的生长。而当 EC 值 $> EC_0$ 时则作物死亡,这个 EC_0 值应根据作物不同的发育阶段给出不同值。

2 模型的验证

本文模型的运行和应用以冬小麦为例进行,并用 1998~1999 年在中国农业大学河北曲周试验站的田间试验来进行验证。通过比较冬小麦生长季土壤水分和盐分的动态实测值与模拟值进行检验。

从图 1、2 中可以看出土壤水分的模拟值与实测值在小麦整个生育期的变化趋势是一致的,在不同灌水时期有一定起伏,但总趋势是下降的,模拟结果较为理想。从模拟值与实测值的回归分析来看,关键淡水处理和淡水充足处理的土壤水分模拟值(y)与实测值(x)之间的回归方程分别为: $y = 1.3747x - 0.0751$, $R^2 = 0.8453$ (关键淡水); $y = 1.2561x - 0.0750$, $R^2 = 0.9182$ (淡水充足); x 为实测值, y 为模拟值。

从图及回归方程相关系数来看,模拟值与实测值基本相吻合,相关显著,但模拟值要高于实测值,特别在小麦拔节期前表现较为明显,这可能是由于土壤表层蒸发模拟还存在一定偏差,从播种到拔节这段时期土壤水分消耗主要是表层土壤水分蒸发,蒸发过程模拟的好坏直接影响土壤水分的变化,而小麦生长后期受土壤蒸发影响较小,因此模拟结果较好。

图 3、图 4 是 1998~1999 年水分处理中淡水充足处理与咸水处理一米土体土壤溶液电导率模拟值与实测值之间的比较。从模拟结果看,模拟值与实测值基本

相吻合,从变化趋势来看,土壤溶液含盐量基本上是持续增加的,模拟值在生长前期要高于实测值,这可能与土壤水分模拟值高于实测值有关,总的来说,用 PS123 模型对土壤盐分动态模拟取得了较好的效果。

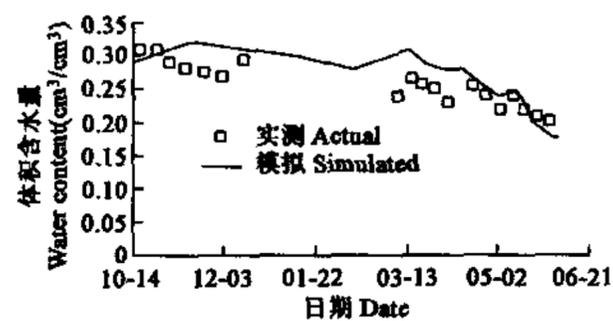


图 1 土壤水分动态模拟(灌水充足,1999)

Fig. 1 Dynamic simulation of soil water (full irrigation 1999)

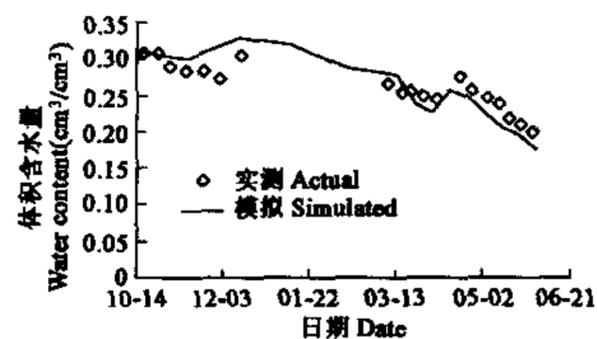


图 2 土壤水分动态模拟(关键淡水,1999)

Fig. 2 Dynamic simulation of soil water (key irrigation, 1999)

3 微咸水长期灌溉可行性及风险性分析

为缓解农业缺水的矛盾,开发利用微咸水资源来替代消耗量巨大的淡水资源具有一定的现实意义,本文将根据 PS123 模型模拟结果对微咸水长期灌溉可行性及风险性进行分析。

3.1 地下水埋深及水质对土壤盐分的影响

盐渍化地区地下水埋深及地下水水质直接影响着土壤盐渍化程度,据研究^[10]地下水位小于 2.5m 是土壤积盐的临界水位,在地下水位较浅条件下,由于土壤水分蒸发及地下水的毛细管上升作用,使土壤表层积盐,特别在地下水矿化度较高地区更应注意地下水位埋深问题。本文模拟了在土壤初始含盐量为 3ms/cm 及不灌水条件下,不同地下水位及水质对土壤积盐状况的影响,通过对模拟可以看出(表 2),在地下水矿化度(1.27ms/cm)较低情况下,当地下水位小于 100cm,土壤 Ece 增加不多,只较原土壤盐分增加 6%左右;100cm 以下地下水位对土壤盐分影响很轻,甚至有轻微脱盐。但在劣质地下水(5.50ms/cm)条件下,地下水位小于 200cm 时会使土壤盐分增加 18%~32%,积盐严重;而在 250cm 以下地下水位条件下,对土壤积盐影响很小,土壤盐分变化状况同优质地下水。因此通过模拟也可以看出土壤积盐的临界地下水位为 2.0~2.5m,在盐渍化地区应严格控制地下水位在 2m 以下,如已超过积盐临界水位,则应通过深沟浅井等工程措施实行排水,降低并控制地下水位,这在已有的研究中已得到了验证^[4,10]。

表 2 不同地下水位和水质对土壤积盐 (Ece, ms/cm) 的影响

Table 2 The effect of different groundwater table and quality on soil salt accumulation

地下水位(cm)Ground water table	50	75	100	150	200	250	300
劣质地下水(5.50ms/cm)Saline water	3.94	3.95	3.89	3.54	2.98	2.93	2.93
优质地下水(1.27ms/cm)Fresh water	3.18	3.18	3.17	3.08	2.94	2.93	2.93

3.2 灌溉次数及灌溉量对土壤积盐的影响

对于微咸水灌溉来说灌溉次数和灌溉量都会影响土壤积盐过程,据研究在盐渍化土壤上灌溉时宜采用大定额灌溉量,这样灌溉对土壤具有一定淋盐作用,小定额灌溉往往具有“勾盐”作用^[4]。本文对此灌溉管理措施也进行了模拟比较。利用 1998~1999 年气象资料,土壤初始 Ece 为 3.0ms/cm,初始基质势 400cm 水柱,地下水位 400cm,灌溉水及地下水水质为 5.5ms/cm,并统一灌溉量为 240cm。共分 2、3、4、6、8 次灌溉,最终土壤 Ece 值见表 3。

从表 3 中可以看出在总灌水量相同条件下,一次灌溉定额较大,土壤最终积盐较低;而灌溉定额小、灌水次数多的灌溉措施积盐量大;随着灌水次数(4~8 次)增加,土壤盐分也不再增加,这主要是小于 60mm 的小定额灌溉不易使土壤盐分淋出根层外,都聚集在根系层中,Ece 变化不大,因此在满足水分供应前提下在作物生长后期应保持灌溉定额在 70~90mm 之间^[9],这样有利于作物后期生长及土壤淋盐。

3.3 微咸水连续多年直接灌溉对土壤盐分的影响

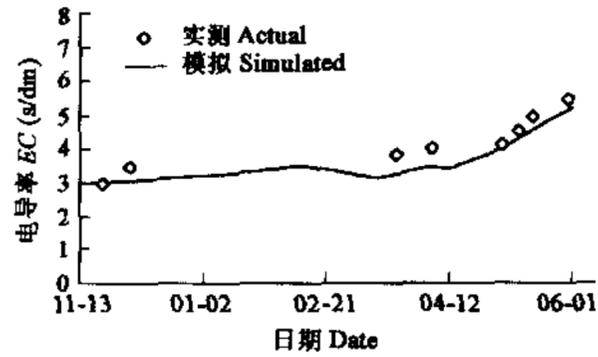


图 3 土壤盐分动态模拟(淡水充足,1999)

Fig. 3 Dynamic simulation of soil salt (full irrigation, 1999)

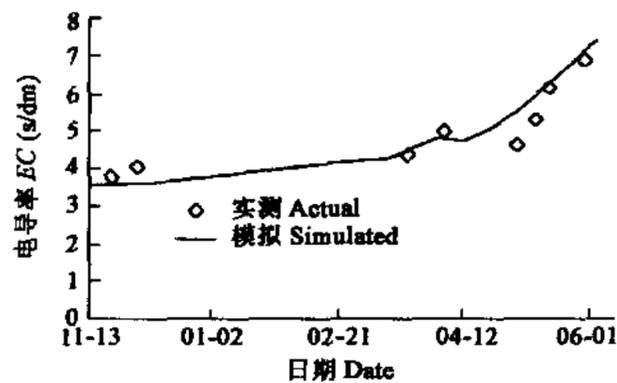


图 4 土壤盐分动态模拟(咸水充足,1999)

Fig. 4 Dynamic simulation of soil salt (full saline water irrigation, 1999)

表 3 不同微咸水灌溉方案对土壤最终含盐量的影响

Table 3 The effect of different irrigation senario on soil salt accumulation

灌溉次数 Irrigation times	灌溉方案(d/mm)Irrigation senarion						ECe (ms/cm)
2	170/120	200/120					4.27
3	170/70	190/70	210/100				4.31
3	170/80	190/80	210/80				4.48
4	170/60	185/60	200/60	215/60			4.63
6	170/40	180/40	190/40	200/40	210/40	220/40	4.67
8	170/30	177/30	184/30	191/30	198/30	215/30	4.65

表 4 模拟了 1994~1998 年 5 个小麦生长季分别在淡水和微咸水直接连续灌溉条件下土壤积盐情况, 1994 年土壤初始 $E_{ce} 3.0 \text{ms/cm}$ (1m^3 土体), 每年灌水量统一为 240mm, 分 3 次灌溉, 基本上可满足作物对水分需求, 每一年模拟盐分的初始值是上一年最后土壤盐分含量。从模拟结果可以看出土壤是逐年积盐的, 但土壤积盐状况明显不同, 虽然用淡水灌溉土壤盐分也略有增加, 实际上土壤通过灌溉和降雨是可以达到盐分平衡状态而不会出现积盐现象。而对于微咸水灌溉来说, 如果在灌溉一年后不采取任何措施继续用微咸水灌溉, 则土壤积盐程度逐渐增高, 5a 后土壤溶液浓度达 20.1ms/cm , 据研究当土壤溶液浓度达 13ms/cm 时就已开始危害冬小麦生长, 模拟结果显示, 在灌咸水第 2 年收获时土壤含盐量就达到 13.6ms/cm , 从第 3 年开始就已开始危害作物。从模拟结果可以认为在灌水量 240mm, 分 3 次灌溉条件下, 只能连续使用 2a, 否则将危害作物生长。

表 4 微咸水多年灌溉条件下土壤积盐状况(ms/cm)
Table 4 Soil salt accumulation under the situation of several — year irrigation with slight saline water(ms/cm)

模拟年份 Year	1994	1995	1996	1997	1998
微咸水灌溉 Saline water	EC 9.6	13.6	15.2	18.7	20.1
淡水灌溉 Fresh water	ECe 4.44	6.09	7.72	9.31	10.93
淡水灌溉 Fresh water	EC 9.5	10.2	10.3	11.1	12.1
淡水灌溉 Fresh water	ECe 3.16	3.41	3.78	4.15	4.38

4 结论及讨论

(1) 本文在土地利用分析模型 PS123 的基础上, 以土壤盐分影响土壤水势从而影响到作物水分吸收和生长状况为突破口, 将盐分对作物生长的影响结合到模型中, 以使模型更加适合于盐渍化土地和微咸水灌溉的使用。

(2) 运用田间试验对模型进行了验证, 模拟结果较好。但模型对土壤蒸发过程的模拟还需进一步改进。

(3) 通过模拟比较也可以看出土壤积盐的临界地下水位为 2.0~2.5m, 在盐渍化地区地下水位应控制在 2m 以下, 如超过积盐临界水位, 则需采取工程措施来控制地下水位。

(4) 微咸水灌溉宜采用少次多量的措施进行较大定额灌溉, 这样可以减少盐分在土壤中的累积, 减轻对作物的影响。

(5) 通过分析得出, 在利用微咸水时, 可在小麦生长季后期使用, 且不能连续灌溉, 最好采用咸淡水轮灌或混灌方式, 并在每季作物生长季结束后即玉米和小麦收获时应采用一次大定额淡水灌溉以使土壤盐分淋出根层, 减小盐分对作物根系的危害。

References:

- [1] Wei Z Y. Distribution character and its reclamation of saline water in 3 H plain. *Control and reclamation of 3 H plain(The first collection)*; Hebei People Press, 1985.
- [2] Khosla B K, Gupta R K, Response of wheat to saline irrigation and drainage, *Agricultural Water Management* 1997, 32: 285~291.
- [3] Atef Hamdy, et al. Saline water management for optimum crop production. *Agricultural Water Management* 1993, 24: 189~203.

- [4] Shi Y C, Xin D H. *Water and salt movement and integrated reclamation of drought, waterlogging and salinity in 3 H plain*, Hebei People Press, 1985.
- [5] Driessen P M & Konijn N T. *Land-use System Analysis*. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 1992.
- [6] Qiao Y H, Yu Z R. Dynamic changes and quantification of winter wheat leaf area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(2):83~86.
- [7] Qiao Y H, Yu Z R. Quantification of dry matter accumulation and distribution among different organs of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5):543~546.
- [8] Zhu T Y. *Soil salinity control in irrigation area*. Beijing: Agricultural Press, 1992.
- [9] Yuan X L. The relationship between winter wheat yield and the water consumption. : The edition team of "the study on water consumption by crops", *The study on the relationship between crops and water*. Chinese Scientific and Technology Press, 1992. 10~17.
- [10] Xin D H, Li W J. *Integrated reclamation and development of the low production salinity area*. Beijing: Agricultural University Press, 1990.
- [11] Wu Z X, Du G C. The station of soil salinity and its utilization in Hebei Cangzhou Prefecture. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22(3):104~105.
- [12] Thorne DW and Peterson H B. *Irrigated soils; their fertility and management*. The blakiston Company Cleveland, 1954.
- [13] Weast R C. *Handbook of chemistry and physics Chemical*. Rubber Publishing Company, Cleveland, 1975.

参考文献:

- [1] 魏忠义. 黄淮海平原咸水分布特征及其改造利用. 黄淮海平原治理与改造, 第一集, 1985.
- [4] 石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理. 石家庄: 河北人民出版社, 1985.
- [6] 乔玉辉, 宇振荣, 等. 华北盐渍化改造区冬小麦叶面积动态变化规律及其定量化. 中国生态农业学报, 2002, 10(2): 83~86.
- [7] 乔玉辉, 宇振荣. 冬小麦干物质在各器官中的累积和分配规律研究. 应用生态学报, 2002, 13(5):543~546.
- [8] 朱庭芸. 灌区土壤盐渍化防治. 北京: 农业出版社, 1992.
- [9] 袁小良, 等. 冬小麦产量与耗水量的关系. 见: 中国科学院台站网络《农作物耗水量研究》课题组主编, 作物与水分关系研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 10~17.
- [10] 辛德惠, 李维炯. 浅层咸水型盐渍化低产地区综合治理与发展. 北京: 北京农业大学出版社, 1990.
- [11] 武之新, 度国成. 河北沧州地区盐渍土现状及其利用改良途径. 土壤通报, 1991, 22(3):104~105.