

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.021

黄淮海平原冬小麦对盐分胁迫的响应研究*

吴忠东¹ 王全九²

(1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255048; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

【摘要】 针对黄淮海平原地区淡水资源匮乏的问题,以当地浅层地下水配置不同矿化度的微咸水进行盐分胁迫实验,对冬小麦主根区土壤含盐量、冬小麦产量以及叶面积指数对盐分胁迫的响应进行了分析。结果表明,在不同的生育期降水量条件下,冬小麦对盐分胁迫有着不同的响应。为获得满意产量,在当地的土壤条件下,生育期一般年和湿润年可以采用的最高矿化度为3 g/L,而在生育期偏早年,如果不采取其他措施的情况下,可以采用的最高矿化度为2 g/L,该结果为合理开发利用当地的地下咸水资源提供了一定的依据。

关键词: 冬小麦 盐分胁迫 产量 叶面积指数

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0099-06

Response to Salt Stress about Winter Wheat in Huanghuaihai Plain

Wu Zhongdong¹ Wang Quanjiu²

(1. Institute of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255048, China

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract

To solve the shortage of freshwater resources in Huanghuaihai plain, salt stress experiments were carried out with different mineralization degrees slight saline water, the response of soil salt content of active rooting zone, yield and leaf area indexes to salt stress were analyzed. It showed that winter wheat has different responses under different rainfalls in growth duration. In order to obtain satisfactory yields, the highest degree of mineralization was 3 g/L in wet years and general years under local soil conditions, while in the drought years, the highest degree of mineralization could be used was 2 g/L without taking other measures. The results provided some basis for the rational development and use of local underground saline water resources.

Key words Winter wheat, Salt stress, Yield, Leaf area index

引言

利用微咸水灌溉可增加土壤湿度,降低土壤溶液的浓度及渗透压,利于作物吸收水分,也可从灌溉水中增加带入土壤中的盐分。灌溉水的矿化度、灌溉次数及水量,决定了土壤盐分增加量^[1]。微咸水灌溉所带入土壤中的盐分会造成土壤剖面上的盐分累积,影响种子萌芽,降低植株的生长速率以及植物的水分利用效率等^[2]。黄淮海平原灌区的农业生

产面临两个主要问题,即水资源短缺问题和土地盐碱化问题,该地区的主要作物均采用大水漫灌,灌溉水的利用效率仅为50%,过量灌溉造成地下水位上升和土壤次生盐碱化。在没有恰当的土壤-水-作物系统管理措施的情况下使用微咸水进行灌溉很有可能对土壤和环境造成严重的危害^[3]。

已有研究表明,在矿化度1~5 g/L范围内,土壤积盐量随入渗水矿化度的增加而增大的幅度最大^[4]。虽然微咸水灌溉增加了土壤盐分,但雨季降

收稿日期:2010-05-24 修回日期:2010-06-21

* 国家自然科学基金资助项目(50879067)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-003)

作者简介: 吴忠东,副教授,博士,主要从事微咸水的地面灌溉及环境效应研究,E-mail: wuzhongdong@126.com

通讯作者: 王全九,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: wquanjiu@163.com

水及播前的底墒水可以使土壤盐分得到淋洗,因此不会影响小麦的出苗和生长^[5]。只要采取一定的淡水压盐措施,低于7 g/L的咸水可以保证冬小麦正常出苗生长^[6]。为了合理开发利用当地的浅层地下微咸水资源,2002~2005年期间开展了0.92~6 g/L的冬小麦盐分胁迫实验。

1 实验材料与方法

1.1 实验地点及其气象条件

实验地点位于河北省沧州市中科院南皮县南皮生态试验站。该站地处北纬38°06′,东经116°40′,属近滨海缺水盐渍化类型区,无地面水灌溉条件,浅层地下咸水资源丰富,地下水埋深为5~7 m,该区域春秋干旱、夏季多雨易涝,使土壤具有明显的季节性积盐或脱盐现象。耕地土壤为轻壤质潮土,土壤含盐量为0.08%~0.15%,土壤有机质质量分数为1.0%~1.2%,耕地土壤为轻壤质潮土,土壤容重密度为1.42 g/cm³,土壤基本物理性质如表1所示。

表1 土壤基本物理性质
Tab.1 Soil physical properties

深度 /cm	各级颗粒质量分数/%			土壤 质地*
	$d \geq$	0.02 mm > $d \geq$	$d <$	
	0.02 mm	0.002 mm	0.002 mm	
0~67	60	22.5	17.5	砂质粘壤土
67~100	52	20.8	27.4	壤质粘土

注:*土壤质地分类参见国际分类标准。

由于降水是随机事件,降水年内分配不同,对作物影响各不相同,所以在分析研究冬小麦消耗土壤水分时主要考虑生育期内降水量的丰缺,根据冬小麦在生育期内降水量可把生育期所在年份分为偏早年、一般年和湿润年。对1995~2005年的冬小麦生育期降水资料进行频率分析,如表2所示。

表2 生育期降水频率分析

Tab.2 Analysis of rainfall frequency in growing period

排序	年度	生育期降水量/mm	排频
1	2003~2004	347.7	0.09
2	1997~1998	248.9	0.18
3	1995~1996	239.2	0.27
4	2000~2001	230.4	0.36
5	1999~2000	190.3	0.45
6	1996~1997	141.2	0.55
7	1998~1999	131.1	0.64
8	2001~2002	116.3	0.73
9	2002~2003	114.4	0.82
10	2004~2005	79.4	0.91

由表2可知,2002~2003年为生育期降水量一

般年,2003~2004年为生育期湿润年,2004~2005年为生育期偏早年。

1.2 实验设计

供试作物为冬小麦,品种为9402,设计了包括淡水对照在内的6种矿化度的微咸水灌溉实验,共设13个小区,3次重复;采样时间为2002年10月上旬~2005年6月上旬。

盐分胁迫实验设在试验站西面,3年施肥和田间管理水平一致,小区面积6.6 m²(3.3 m×2 m),播量为225 kg/hm²,为了防止侧渗,小区之间用高1.5 m的塑料板相互隔开,下不封底,随机排列。因冬小麦幼苗期对盐分比较敏感^[7],播前底墒水均为淡水,灌水量为600 m³/hm²;生育期内灌溉次数为2~3次,灌水方式参照当地漫灌方式,每年灌水总量均为1350 m³/hm²(不含底墒水)。表3为2002~2005年盐分胁迫实验方案。

表3 2002~2005年微咸水灌溉制度
Tab.3 Irrigation program of saline water from 2002 to 2005

年份	m ³ /hm ²	
	播前灌溉	生长期灌溉
2002~2003	600(1次)	675(2次)
2003~2004	600(1次)	450(3次)
2004~2005	600(1次)	450(3次)

1.3 灌溉水质

实验区为滨海和内陆过渡地区,无地面水灌溉条件,浅层地下咸水资源丰富,地表20 m以下均为咸水,最咸层出现在35~38 m,矿化度高于30 g/L^[8];为了使实验水质能反映当地地下水的特点,在实验前对地下水情况进行了初步调查。对南皮试验站附近30多个机井的调查结果表明,地下水矿化度大多为1~3 g/L,少数达到3 g/L以上,最高矿化度达7 g/L。灌溉水的矿化度采用加权平均法确定为

$$M = \frac{M_f Q_f + M_s Q_s}{Q_f + Q_s} \quad (1)$$

式中 M ——混合后水的矿化度,g/L

M_f ——淡水矿化度,g/L

M_s ——咸水矿化度,g/L

Q_f ——淡水流量,L/h

Q_s ——咸水流量,L/h

实验根据式(1)采用田间耐盐性梯度比较的方法将矿化度分别控制在0.92、2、3、4、5、6 g/L共6个水平。所有实验用水均由站内深机井淡水和站东1000 m处浅机井咸水配置而成,深井水电导率为1.10~1.45 dS/m,矿化度为0.84~1.35 g/L,可以作为淡水直接用于灌溉;浅井水电导率为5.50~

7.40 dS/m。每次灌水前使用电导仪标定实验用水矿化度;由于地下水水质有一定波动性,每次灌水时水中各离子含量不完全相同。试验站配置了实验水源

工程和输水管道,用于人工配置不同矿化度的灌溉水,灌溉水量用水表严格计量。灌溉水水质分析如表 4 所示。

表 4 灌溉水水质分析
Tab.4 Irrigation water quality

矿化度 /g·L ⁻¹	电导率 /dS·m ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mmol·L ⁻¹	Cl ⁻ /mmol·L ⁻¹	SO ₄ ²⁻ /mmol·L ⁻¹	Ca ²⁺ /mmol·L ⁻¹	Mg ²⁺ /mmol·L ⁻¹	Na ⁺ + K ⁺ /mmol·L ⁻¹	SAR /(mmol·L ⁻¹) ^{0.5}
0.92	1.4	8.3	4.1	0.5	2.2	7.7	2.0	1.2
2	3.0	2.7	7.1	5.5	0.3	3.9	11.5	8.0
3	4.5	12.7	23.5	26.8	5.9	19.9	29.3	4.7
4	6.1	12.7	33.2	33.2	8.6	23.9	36.0	5.8
5	7.6	12.7	46.1	44.5	11.8	32.0	45.1	6.8
6	9.2	7.2	25.1	18.0	4.0	16.0	25.5	8.1

1.4 观测项目和方法

(1) 土壤水盐观测

土壤取样层次为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm,共有取样点 130 个,取土时间为每次灌水前 1 d 和后 2 d,土壤含水率的测定采用干燥法,土壤含盐量的测定采用络合滴定法。

(2) 小麦生理性状观测

小麦生理性状监测内容包括每次灌水前后的株高、叶面积、叶绿素含量、植株鲜质量和干质量;麦收时测单位面积穗数、穗粒数和千粒质量、作物产量等产量指标。每个处理每次取 10 个样,株高用直尺直接测量,叶面积用叶长、叶宽的乘积和折算系数获得,叶绿素含量用光合作用仪测定。

(3) 气象观测

站内设有小型气象站,观测内容包括每日 8:00、14:00 和 20:00 的干球和湿球温度,日最高和最低温度,每天的水面蒸发量和降水量等。

2 结果及分析

2.1 实验区冬小麦主根区含盐量的动态变化

土壤盐分含量对农作物的出苗、成活及其生长发育状况都有直接影响^[9]。在实验条件下,冬小麦主根区含盐量主要受生育期降水量和灌溉水的矿化度影响,该区域的含盐量对冬小麦的正常生长起着非常关键的作用,如果盐分含量过高会造成根系的盐分胁迫,影响作物对水分的有效利用。据当地研究资料表明,冬小麦主要根系 80% 位于 0 ~ 40 cm,因此称这一层为主根区^[10]。2002 ~ 2005 年盐分胁迫条件下主根区(0 ~ 40 cm)土壤平均含盐量的动态变化过程如图 1 所示。

由图 1 可知,随时间推移,实验区主根区平均含盐量随着生长期的推移呈上升趋势,且每次灌水后

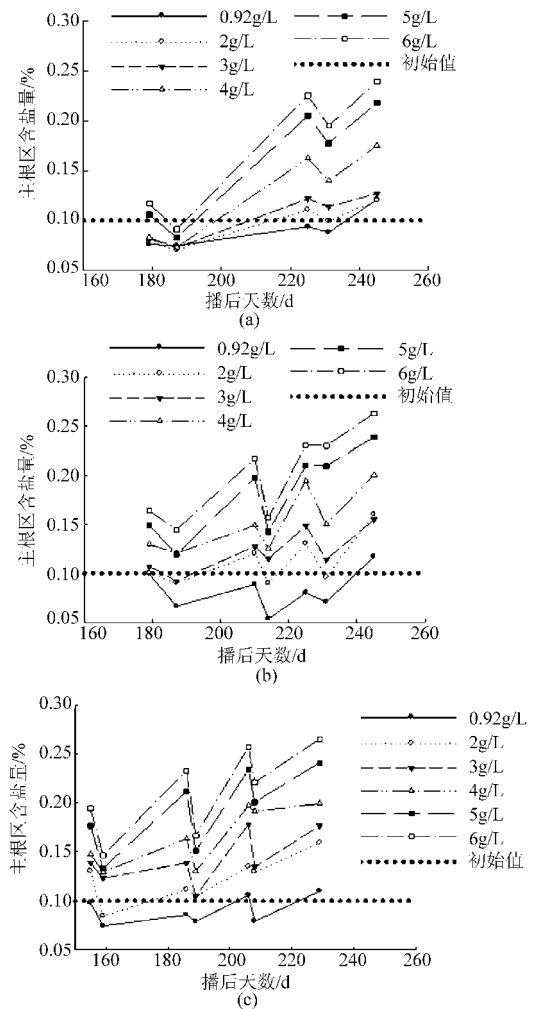


图 1 2002 ~ 2005 年盐分胁迫条件下主根区土壤含盐量的变化

Fig. 1 Variation of taproot region soil salt content under salt stress from the year of 2002 to 2005

(a) 2002 ~ 2003 年 (b) 2003 ~ 2004 年 (c) 2004 ~ 2005 年

主根区平均含盐量有所降低,在下次灌水前盐分随着水分的蒸发而被带入主根区土壤,造成含盐量上升。但不同年份受灌溉水矿化度和降水量的影响,

在积盐程度和动态变化的程度上又有所差异。

2002~2003年是降水一般年,淡水灌溉后主根区土壤在整个生育期除了麦收后均未产生积盐现象;采用矿化度3 g/L以内的微咸水进行灌溉后,大部分阶段均发生积盐现象,但积盐率相对较低,积盐最严重的阶段是麦收后;而矿化度高于3 g/L的微咸水灌溉后在整个生育期内主根区均发生积盐,矿化度6 g/L的微咸水灌溉后主根区土壤积盐现象最为严重,积盐率达264.99%。

2003~2004年为湿润年,冬小麦采用淡水灌溉后主根区土壤含盐量没有明显增加,且每次灌水后有明显脱盐效果,主根区最大脱盐率为33.67%,因此淡水灌溉能使主根区土壤盐分下移,有利于冬小麦根系的生长发育。采用矿化度2 g/L和3 g/L的微咸水进行灌溉在表层主根区土壤的积盐率没有明显差别,当灌水矿化度高于3 g/L时,主根区土壤均发生了明显的积盐现象,麦收后主根区积盐最严重,随着矿化度由4 g/L升高到6 g/L,积盐率分别达到200.48%、239.04%和262.95%,在次年的播种前必须采用淡水压盐措施来降低主根区的土壤含盐量,否则会影响冬小麦出苗率。

2004~2005年冬小麦生长期降水量偏少,生长后期随着冬小麦耗水量的增加和气温的上升,土壤表层和主根区的含盐量增幅比生长初期加大,对作物生长形成不利因素,严重的还会造成土壤次生盐渍化,这种现象在许多灌区都存在。尽管灌水会溶解土壤中部分盐分使之向下运移,但蒸发作用会使水分携带盐分向上运移,水分被蒸发而消耗,盐分残留在上层土壤中。接近生长后期,土壤盐分按照矿化度呈现层状分布。矿化度高于2 g/L的条件下,主根区均发生积盐现象,土壤与上一年度相比较,因为降水量偏小,降水对土壤表层盐分的淋洗作用大大降低,所以表现为在同一生长阶段,2004~2005年的土壤含盐量均比2003~2004年高。

综上所述,矿化度较高的微咸水带入主根区的盐分较多,并且随着时间的延长,盐分的表聚现象越严重,因此矿化度较高的微咸水不宜作为灌溉水。

2.2 盐分胁迫对产量的影响

不同的灌溉水质对产量有不同的胁迫程度,进而形成不同的产量。产量对盐分胁迫的响应如表5所示。

由表5可知,2002~2005年的产量总的来说随着矿化度的升高而有减小趋势,但在不同的年度矿化度对产量构成因子的影响程度有所差异。2002~2003年为生育期降水一般年,淡水处理的产量与矿化度2 g/L微咸水灌溉后的冬小麦产量无显著差

异,但明显高于矿化度3 g/L以上的微咸水灌溉后的冬小麦产量。矿化度6 g/L的咸水灌溉后冬小麦产量明显低于2~5 g/L的微咸水灌溉后的冬小麦产量。因此在生育期降水一般年,为获得较满意的产量,利用微咸水进行灌溉矿化度最高应控制在2 g/L。

表5 冬小麦产量对盐分胁迫的响应

Tab.5 Responses of winter wheat yield to salt stress

矿化度 /g·L ⁻¹	产量/kg·hm ⁻²		
	2002~2003	2003~2004	2004~2005
0.92	5 601.81 ^a	5 700.37 ^a	5 262.91 ^a
2	5 470.20 ^{ab}	5 580.05 ^{ab}	5 040.05 ^b
3	5 200.13 ^b	5 400.65 ^{ab}	5 000.43 ^b
4	4 594.15 ^{bc}	4 667.44 ^b	4 500.78 ^{bc}
5	4 324.22 ^{bc}	4 507.73 ^{bc}	3 900.96 ^c
6	3 459.035 ^c	3 886.89 ^c	3 790.46 ^c

注:a、b、c代表0.5%显著性差异。

在生育期湿润年(2003~2004年)淡水处理的产量构成因子与矿化度2、3 g/L处理均无显著差异,明显高于矿化度4~6 g/L处理,说明当生育期降水量较大时,降水量对土壤盐分的淋洗作用在一定程度上降低了微咸水造成的盐分胁迫,当矿化度升高到4 g/L以上时,盐分胁迫对产量构成因素产生了影响并最终对产量造成影响,因此在湿润年的灌水矿化度应控制在3 g/L左右。

2004~2005年为生育期偏旱年,淡水处理的产量明显高于矿化度大于2 g/L的微咸水处理,由此可见,在实验条件下,干旱年利用微咸水因作物受水分和盐分的双重胁迫,最终导致产量较淡水有较大损失。

通过以上分析可知冬小麦微咸水混灌应结合生育期降水预测结果来确定适宜的矿化度,如果利用较高矿化度的微咸水进行灌溉应则避免在盐分敏感期进行,或者加大微咸水灌溉定额进行盐分淋洗以免对作物正常生长造成不利影响^[11]。

2.3 盐分胁迫对叶面积指数的影响

叶面积即光和作用面积的大小,叶面积直接影响了干物质积累量。一定范围内,叶面积及其功能与产量呈正相关^[12]。盐分胁迫下叶面积随着胁迫程度的加重而减小,同时这也是冬小麦对盐分胁迫的自我适应机制,即作物通过减少蒸腾蒸发表面积来尽可能减少奢侈耗水^[13]。叶面积指数(leaf area index,简称LAI)为

$$L = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij} \times 10^{-4} \quad (i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

其中 $A_{ij} = kl_{ij}b_{ij}$ (3)

式中 A_{ij} ——第 j 株冬小麦第 i 个单片叶子面积, cm^2

n ——每一株冬小麦上叶子的个数

m —— 1 m^2 耕地上种植冬小麦的株数

k ——冬小麦的叶面积折算系数, 一般取 0.87

l_{ij} ——第 j 株冬小麦上第 i 个单片叶子长, cm

b_{ij} ——第 j 株冬小麦上第 i 个单片叶子宽, cm

实验期内叶面积指数随时间的变化如图 2 所示。

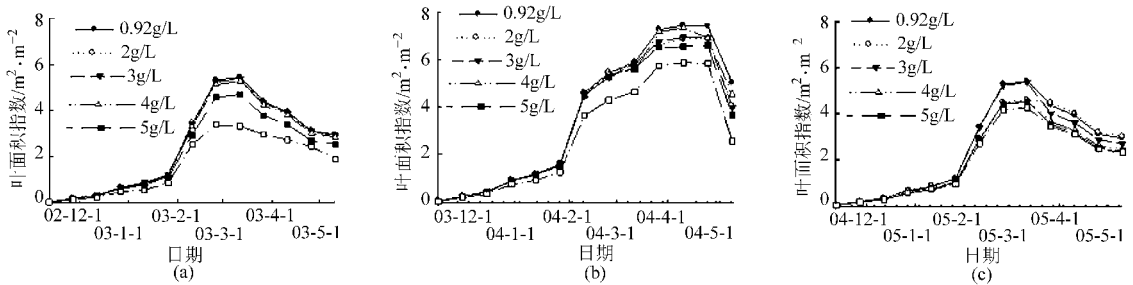


图 2 2002 ~ 2005 年盐分胁迫条件下叶面积指数

Fig. 2 Leaf area index under salt stress from the year of 2002 to 2005

(a) 2002 ~ 2003 年 (b) 2003 ~ 2004 年 (c) 2004 ~ 2005 年

由图 2 可见, 在盐分胁迫条件下, 实验期内各处理的叶面积变化趋势为: 冬小麦出苗到拔节期植株生长缓慢, 叶面积增大幅度较小, 各处理的叶面积指数没有明显差别; 从拔节期后叶面积迅速增长, 各盐分胁迫处理与淡水处理的叶面积指数差别逐渐增大; 在作物生长盛期(抽穗 ~ 灌浆期)各处理的叶面积指数均达到峰值; 灌浆期后叶面积指数急剧下降。无论盐分胁迫程度如何, 各处理中的叶面积指数在整个有观测值生育期的规律相似, 冬小麦在任一生育阶段遭受盐分胁迫, 其叶面积指数均低于淡水处理。

在生育期降水一般年(2002 ~ 2003 年), 当矿化度不高于 3 g/L 时, 遭受盐分胁迫处理的冬小麦叶面积指数与对照无明显差异; 当矿化度高于 3 g/L 时, 盐分胁迫处理的叶面积指数从拔节期开始明显低于对照, 尤其在生育后期叶面积指数比对照低 35.95%。说明长期盐分胁迫使作物的叶绿体结构和功能受到很大破坏, 其光合能力大大下降, 叶片生长受抑制, 叶早衰现象非常严重。

在生育期湿润年(2003 ~ 2004 年), 当矿化度不高于 4 g/L 时, 盐分胁迫处理的冬小麦叶面积指数与对照无明显差异, 只有当灌溉水矿化度高于 4 g/L 时, 才使叶面积指数有明显降低, 而且该年的叶面积指数比 2002 ~ 2003 年和 2004 ~ 2005 相比较, 相同矿化度处理的叶面积指数较大。这是因为充足的降水相当于使主根区土壤得到了有效淋洗, 为冬小麦根系发育创造了较好的环境, 使得盐分胁迫的影响程度得到了一定缓解, 从而使叶面积指数相对大于降水一般年和干旱年。

在生育期降水较少的 2004 ~ 2005 年, 返青-拔节各处理的叶面积指数差别不明显, 从拔节期开始, 叶面积指数开始大幅度增加。由图 2 可知, 当矿化

度不高于 3 g/L 时, 盐分胁迫对叶面积指数没有明显效应, 说明 3 g/L 以内的微咸水对冬小麦生长发育无明显影响, 因此可以替代淡水进行灌溉。而矿化度高于 3 g/L 时, 叶面积指数受盐分胁迫的影响有明显降低。这是因为在干旱年进行盐分胁迫, 会造成盐分-水分对作物的双重胁迫, 尤其是当土壤孔隙中的水分不足时, 采用微咸水进行灌溉, 进入土壤的盐分在土壤含水率较低的情况下会使土壤溶液的浓度升高, 抑制根系对水分和养分的吸收, 造成作物的生理性干旱, 加重了盐分的胁迫效应, 并最终影响作物的产量。

3 结论

(1) 在不同的生育期降水条件下, 盐分胁迫会造成主根区土壤积盐, 在降水一般年和湿润年, 高于 3 g/L 的微咸水灌溉后生育期内主根区均发生积盐, 且积盐程度与矿化度正相关。而在偏早年, 只要矿化度高于 2 g/L , 均会在主根区土壤造成积盐从而影响作物产量, 因此如果在偏早年进行微咸水灌溉, 应在麦收后采用淡水压盐或采取大定额的微咸水淋洗, 防止土壤发生次生盐渍化。

(2) 通过对产量的分析可知, 在生育期降水一般年, 为获得较满意的产量, 利用微咸水进行灌溉矿化度最高应控制在 2 g/L ; 在湿润年灌溉水矿化度应控制在 3 g/L 左右; 生育期偏早年、干旱年利用微咸水灌溉, 因作物受水分和盐分的双重胁迫, 最终导致产量较淡水有较大损失, 因此不宜采用微咸水进行灌溉。

(3) 冬小麦从拔节期后叶面积迅速增长, 各盐分胁迫处理与淡水处理的 LAI 差别逐渐增大, 为了使冬小麦的叶绿体结构和功能避免盐分胁迫对其造

成不利影响,在生育期降水一般年,灌溉水矿化度不宜超过 3 g/L;在生育期湿润年,充足的降水相当于使主根区土壤得到了有效的淋洗,因此灌溉水矿化度不高于 4 g/L 时,可以保证冬小麦叶片的正常生

长;在偏旱年,3 g/L 以内的微咸水对冬小麦生长发育无明显影响,可以替代淡水进行灌溉,否则会造成作物的生理性干旱,加重了盐分的胁迫效应,并最终影响作物的产量。

参 考 文 献

- 刘昌明,魏忠义. 华北平原农业水文及水资源[M]. 北京:科学出版社,1989:38~39.
- Feizi M. Long term effect of using saline water on soil salinity and sodicity[C]//The 10th Afro-Asian Regional Conference of International Commission on Irrigation and Drainage(ICID), Bali, Indonesia, 1998: 89~95.
- Sharma B R, Minhas P S. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2005,78(1~2):136~151.
- 郭太龙,迟道才,王全九,等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(增刊):84~87.
Guo Tailong, Chi Daocai, Wang Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp.):84~87. (in Chinese)
- 乔玉辉,宇振荣. 河北省曲周盐渍化地区微咸水灌溉对土壤环境效应的影响[J]. *农业工程学报*,2003,19(2):75~79.
Qiao Yuhui, Yu Zhenrong. Effect of brackish water on soil environment in saline area of Quzhou of Hebei Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003,19(2):75~79. (in Chinese)
- 张永波,时红. 冬小麦高产咸水灌溉制度的田间试验研究[J]. *农业工程学报*,2000,16(1):44~48.
Zhang Yongbo, Shi Hong. Field test study on salt water irrigation systems in the high-yielding cultivation of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2000,16(1):44~48. (in Chinese)
- Khosla B K, Gupta R K. Response of wheat to saline irrigation and drainage[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 32(3):285~291.
- 方生,陈秀玲. 浅层地下咸水利用和改造的研究[J]. *河北水利科技*,1996,20(2):6~11.
Fang Sheng, Chen Xiuling. Study of both utilization and reconstructive about shallow layer underground saline water[J]. *Hebei Technology of Hydraulics*, 1996,20(2):6~11. (in Chinese)
- 吴忠东,王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11):71~76.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11):71~76. (in Chinese)
- 张永波,王秀兰. 表层盐化土壤区咸水灌溉试验研究[J]. *土壤学报*,1997,34(1):53~59.
Zhang Yongbo, Wang Xiulan. Experimental investigation of saline water irrigation at surface layer salification soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*,1997, 34(1):53~59. (in Chinese)
- 吴忠东,王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. *农业机械学报*,2010,41(7):64~69.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(7):64~69. (in Chinese)
- 徐学选,穆兴民. 小麦水肥产量效应研究进展[J]. *干旱地区农业研究*,1999,17(3):6~12.
Xu Xuexuan, Mu Xingmin. Research achievements on the relationship between wheat yield and water and fertilizer[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,1999,17(3):6~12. (in Chinese)
- 张永强,姜杰. 水分胁迫对冬小麦叶片水分生理生态过程的影响[J]. *干旱区研究*,2001,18(1):57~61.
Zhang Yongqiang, Jiang Jie. Effects of leaf water physiologically ecology process of winter wheat on soil-water stress condition[J]. *Arid Zone Research*,2001,18(1):57~61. (in Chinese)
- 吴忠东,王全九. 微咸水连续灌溉对冬小麦产量和土壤理化性质的影响[J]. *农业机械学报*,2010,41(9):36~43.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect of saline water continuous irrigation on winter wheat yield and soil physicochemical property[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(9):36~43. (in Chinese)