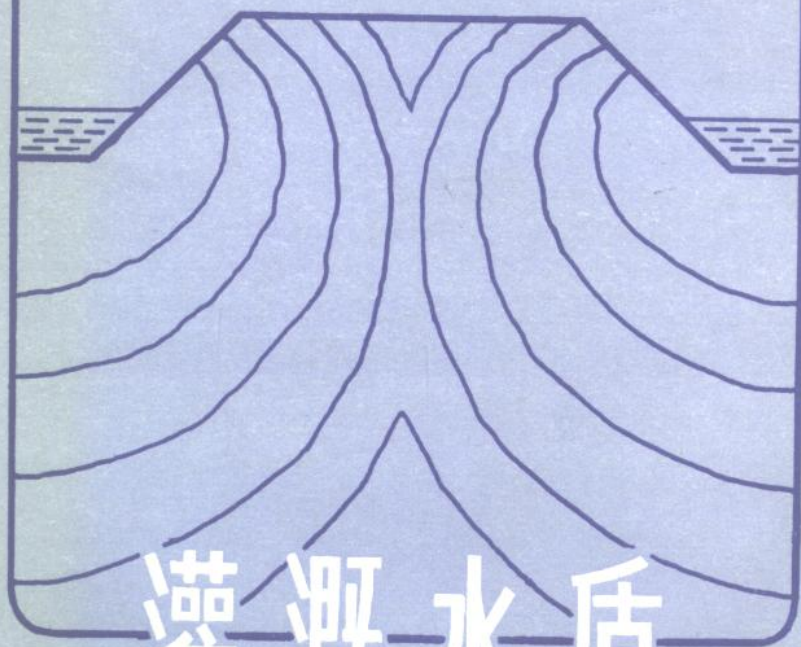




灌溉水质

I. 山伯格 J.D. 奥斯特

鲁光四 洗鼎芳译

水利电力出版社

灌 溉 水 质

I. 山伯格 J.D. 奥斯特

金 光 四 洗 鼎 芳 译

水利电力出版社

I. Shainberg J.D. Oster
Quality of Irrigation Water
Published 1978 by the International
Irrigation Information Centre

灌溉水质
I. 山伯格 J.D. 奥斯特
鲁光四 沈鼎芳译

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 2.25印张 47千字
1984年5月第一版 1984年5月北京第一次印刷
印数 0001—4810 册 定价 0.31元
书号 15143·5402

译 者 的 话

为了满足我国从事灌溉排水和盐碱土改良工作的科技人员的需要，我们将国际灌溉情报中心出版的《Quality of Irrigation Water》一书翻译成中文。本书论述了灌溉对水质的要求、土壤理化性质与水质的关系、农作物的耐盐性及其影响因素、如何进行合理灌溉和冲洗改良土壤、控制含盐量等内容。

本译文经李纬质同志校阅，对提高译稿质量帮助很大，特此表示衷心的感谢。

限于水平，译文中可能还有很多不妥之处，恳请广大读者批评指正。

1983年7月

目 录

译者的话

I 绪论	1
II 灌溉水的性质	2
(一) 总盐分浓度	2
1. 可溶性固体总量 (TDS) [2] 2. 用电导度 (EC)	
来确定可溶性盐 [3]	
(二) 离子组成	6
1. 主要成分 [6] 2. 微量成分 [7] 3. 浊	
度 [9]	
(三) 由化学组成导出的溶液参数	10
1. 钠吸附比 (SAR) [10] 2. 残余碳酸钠	
(RSC) [13] 3. 饱和指数 (SI)、 pH_s^* 和	
SAR [15]	
(四) 灌溉水质实例	17
III 土壤性质对水质的影响	18
(一) 粘土矿物的性质和电荷的由来	19
(二) 扩散双电层	22
1. 反离子的价数对双电层形状的影响 [23] 2. 盐	
分浓度对扩散双电层形状的影响 [23]	
(三) 粘土颗粒的膨胀和分散	23
1. 单一 Na 离子系统和单一 Ca 离子系统 [23]	
2. Na/Ca 混合系统 [24]	
(四) 土壤中所含盐分对导水度的影响	26

(五) 离子交换平衡·····	28
IV 作物生长与盐渍度·····	29
(一) 植物对盐渍度的反应·····	30
1. 植物的症状[30] 2. 盐害的机理[30] 3. 土壤盐渍度与植物生长[32]	
(二) 耐盐能力的评价·····	33
(三) 影响耐盐能力的因素·····	34
1. 植物因素和植物耐盐能力表[35] 2. 土壤因素[41] 3. 气候因素[43]	
V 控制盐分的灌溉管理·····	44
(一) 基本原理·····	44
(二) 盐分平衡和冲洗需水量·····	45
1. 通用公式[45] 2. 冲洗需水量[46] 3. 作物带走的盐分[49] 4. 化学反应[49]	
(三) 碱化度的危害·····	52
(四) 灌溉方法与控制盐渍度的关系·····	54
1. 地面灌溉[54] 2. 喷灌[55] 3. 滴灌[57]	
(五) 土壤改良·····	57
1. 钠质土的改良[57] 2. 盐土的改良[60]	
VI 参考文献·····	62

I 绪 论

在世界上许多地方，来源于雨水或地下水的^{有效}土壤水分不足以满足植物生长的需要，至少在生长季节的部分时段是如此。所缺少的水分可以用灌溉水来弥补。

虽然灌溉在世界上已经有几千年的历史，但是直到本世纪，灌溉水质的重要性才被人们所认识。含盐水的利用会导致作物减产，而钠质水则可使土壤物理性质变坏，其结果也必然是产量下降。现在人们对于水质对环境的影响，包括那些可能出现的有潜在危害的微量物质的影响，已经给予了相当的注意。

在干旱气候条件下，灌溉水质特别重要。无论是由土壤矿物就地风化所形成的盐分或者从所使用的水中沉积的盐分，都会导致盐分在土壤剖面中积累。

一立方米雨水中的含盐量为5~40克，而用于灌溉的水可以含有高达3000克/立方米的盐分。使用100毫米深、含有1000克/立方米盐分的灌溉水，即等于在一公顷土地中引进了一吨盐分。因此，为了使土地保持在适于继续种植的含盐水平，就必须将冲洗和排水作为灌溉计划的组成部分加以考虑。

随着水资源日益受到限制，利用高钠的或高含盐量的，或二者含量都高的劣质水来灌溉的趋势正在增长。如果没有根据劣质水的可能危害而采取适当的管理措施，则长期使用这种水灌溉是不可能的。

II 灌溉水的性质

灌溉水质由下述化学特征来确定：

- 1) 可溶盐的总浓度，或盐渍度。
- 2) 钠相对于其他阳离子的浓度，或碱化度。
- 3) 水的阴离子组成，特别是重碳酸根和碳酸根的浓度。
- 4) 硼或其他对植物生长会有毒害的元素的浓度。

有些研究单位和学者已经制定出用于灌溉水分析的通用技术规程[理查兹 (Richards)，1954；布莱克 (Black)，1965]；此处仅谈及一般原理。

(一) 总盐分浓度

盐分主要通过它的渗透性对作物生长产生影响。渗透压具有取决于离子总数量的特性，因而使它与总盐分浓度的关系较之与某一类离子浓度的关系更为密切。常用的盐分浓度测定方法有二：

1. 可溶性固体总量 (TDS)

将一份经过过滤的溶液试样置于已知重量的铂质皿中蒸发至干。称量其残渣的重量，以毫克/升或百万分之一 (ppm) 为单位表示盐分重量。对于不含重碳酸盐的水，这个方法是精确的，因为大约有一半的重碳酸盐在加热的过程中损失掉了，而使测出的TDS值偏低。

2. 用电导度 (EC) 来确定可溶性盐

水样的EC值由测量浸入溶液中的两个平行电极之间的电阻来确定。纯水是一种不良导体，而含盐水则能导电，其电导与含盐量近似地成正比。比电导，即单位截面积和单位距离的电导度，是由测量电导池的电阻，并按下列关系式求得：

$$EC = k/R \quad (\text{II-1})$$

式中 k 为电池常数， R 为电阻。

EC的基本单位是姆欧·米⁻¹ (mho·m⁻¹)，或标准国

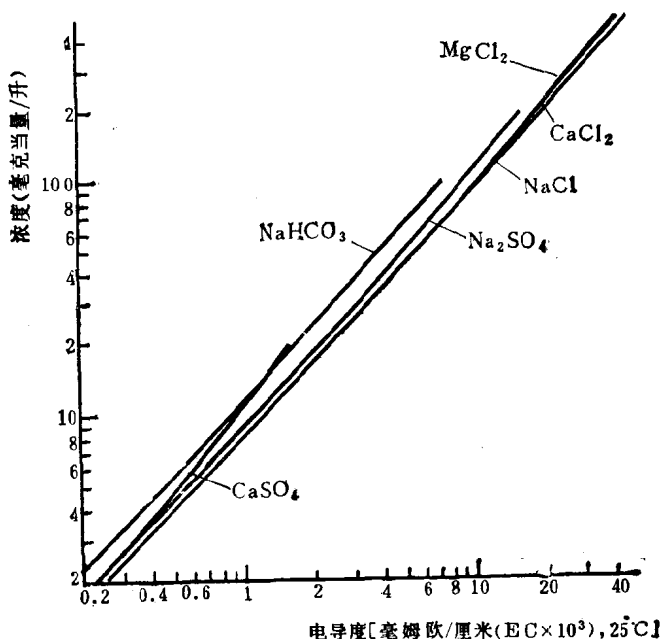


图 II-1 各种盐溶液的浓度 (毫克当量/升) 与电导度的关系

际单位西门子/米 ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)。姆欧是欧姆的倒数。过去人们发现,采用姆欧/厘米 ($\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$)、毫姆欧/厘米 ($\text{mmho}\cdot\text{cm}^{-1}$)及微姆欧/厘米 ($\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$)为单位较为方便。 $1\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}$ 等于 $100\text{mmho}\cdot\text{cm}^{-1}$ 或 $100\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。于是,典型的灌溉水可能含有 $\text{EC}=2000\mu\text{mho}\cdot\text{cm}^{-1}=2\text{mmho}\cdot\text{cm}^{-1}=0.2\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。本书中的常用单位是毫姆欧/厘米 (mmho/cm)。

各种盐溶液的浓度 (以毫克当量/升及毫克/升表示) 与

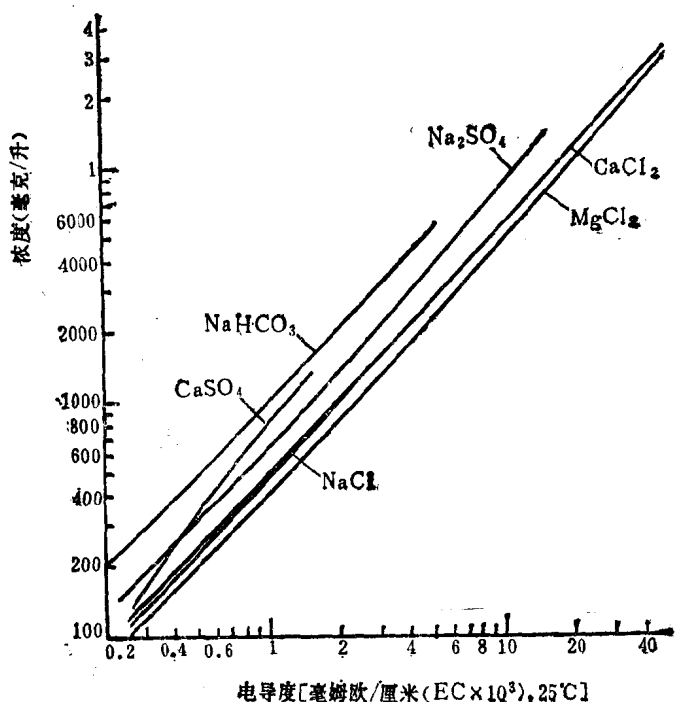


图 II-2 各种盐溶液的浓度 (毫克/升) 与电导度的关系

EC之间的关系示于图II-1及II-2。以毫克/升(ppm)(图II-2)表示浓度的曲线较之以毫克当量/升(图II-1)表示浓度的曲线更显分散。这是因为, EC的大小取决于离子数而不是它们的重量, 而以ppm表示的浓度则取决于它们二者。尽管如此, 对于 $10\text{mmho}\cdot\text{cm}^{-1}$ 范围以内的混合盐分来说, 其水溶液的EC和TDS之间仍有一种线性关系:

$$\text{TDS}(\text{ppm}) = 640 \times \text{EC}(\text{mmho}/\text{cm}) \quad (\text{II-2})$$

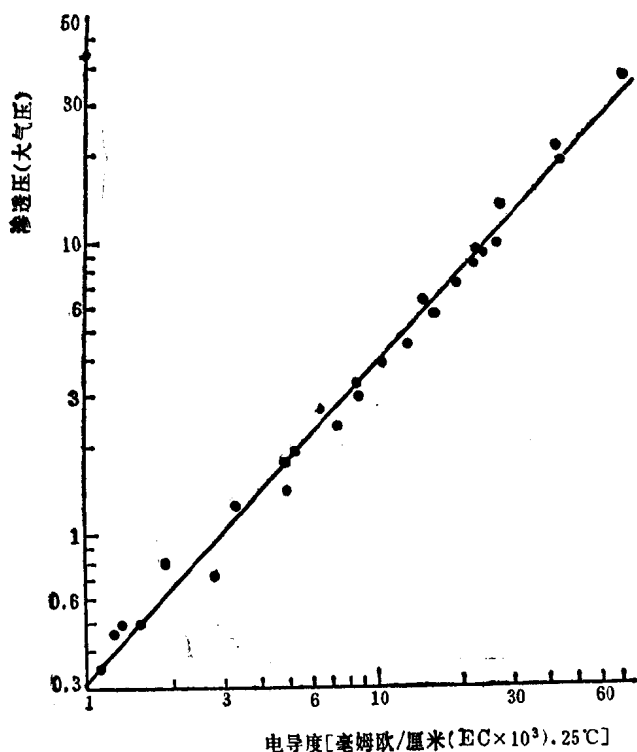


图 II-3 土壤提取液的渗透压与电导度的关系

含有几种离子的土壤提取液的渗透压 (OP) 与电导度之间的关系示于图II-3。

在植物能够生长的EC范围内, 渗透压为:

$$OP = 0.36 \times EC(\text{mmho/cm}) \quad (\text{II-3})$$

温度每上升一度, 盐分的水溶液的电导度以大约2%的速率增大。已发表文献中的电导度测定的标准温度是25℃, 表示为EC₂₅。通常可查阅温度校正表来进行温度的校正(理查兹, 1954), 或者在电测仪器上用校正刻度盘来进行校正。

(二) 离子组成

1. 主要成分

灌溉水中主要的阳离子和阴离子为钙、镁、钠、重碳酸根、硫酸根、氯根和硝酸根。如果pH大于8.3, 则碳酸根的浓度就显得重要起来。钾的浓度通常小于1毫克当量/升。兹将水分析中需要考虑的几个问题分述于下:

i) 溶液总是保持电中性的, 因此, 以毫克当量/升表示的总阳离子和总阴离子的浓度必然相等。

ii) 过去, 由于分析过程复杂, 硫酸根的浓度不经常进行测定。现在这种情况已经改变。在美国盐碱土试验室, 目前已将比浊法[吉尔克里雅斯(Gilcreas)等, 1965, 第291页]用于常规分析。用阳离子总量与阴离子总量之间的差值来估算硫酸根的浓度的方法不应提倡, 单项测定可以保证整个化学分析结果的精确性, 因为在精确的分析中, 阳离子总量与阴离子总量应当相等。

iii) 碳酸钙是微溶性的。在高pH值(含CO₃²⁻)的水

中，钙的浓度非常之低，当存在高浓度重碳酸根时，钙的浓度也不会高。然而，土壤水提取液和水样常常被碳酸钙所饱和。为了防止沉淀反应对分析结果产生影响，建议将样品置于低温下贮存，尽快测定 Ca^{2+} 及 HCO_3^- ，以及采取样品稀释等方法。

iv) 溶液的电导度以毫姆欧/厘米表示并乘以 10，近似地等于以毫克当量/升表示的总阳离子浓度或总阴离子浓度。

v) 灌溉水的pH值，由于往往被土壤所缓冲，而且大多数作物对灌溉水的pH值有一个相当宽的忍耐范围，因此不作为水质评价的通用标准。

2. 微量成分

某些可溶性微量元素对作物生长可以起抑制作用。这类元素包括硼、锂、硒和一些重金属元素。在怀疑受到污染的区域，对这些溶质应该进行分析。详细的分析方法可参考布莱克的著作（1965）。兹将最常见的微量元素简述如下。

a) 硼

硼存在于所有的天然水中，其浓度变化于痕迹量至几个ppm之间。硼是植物生长所必需的元素，但是，当浓度稍稍超出最优值时即非常有害。最广泛采用的灌溉水中硼的标准是理查兹于1954年提出的标准，后来威尔科克斯 [(Wilcox) 1960] 根据作物对硼的敏感性提出了一个分类，示于表 II-1。

众所周知，硼作为灌溉水的一个成分，当被加入土壤后，有相当大的一部分被土壤固定或吸附，其剩余部分保留在土壤溶液中。植物只对溶液中的硼有反应，而与被吸附的硼无关[哈切尔(Hatcher)等，1959]。因此，凡影响吸附硼和可溶性硼平衡的诸条件都与植物营养和灌溉水质评价密切相关。由于吸附作用，使含有临界硼值的灌溉水不会立即显

表 II-1 灌溉水中硼的极限量（根据对砂床中敏感、半耐硼及耐硼作物观察的结果）

对 硼 敏 感 的 0.3~1ppm硼	半 耐 硼 的 1~2ppm硼	耐 硼 的 2~4ppm硼
柑 桔	菜 豆	胡 萝 卜
鳄 梨	甘 薯	莴 苣
杏	辣 椒	结 球 甘 兰
桃	燕 麦	芜 菁
櫻 桃	西 非 高 粱	洋 葱
柿	玉 米	蚕 豆
无 花 果	小 麦	苜 蓿
葡 萄	大 麦	菜 用 甜 菜
苹 果	油 橄 榄	饲 料 甜 菜
梨	紫 花 豌 豆	糖 甜 菜
李 子	萝 卜	棕 榈
青 豆	蕃 茄	龙 须 菜
耶 路 撒 冷 菊 芋	棉	
核 桃	马 铃 薯	
	向 日 葵	

注 表中每组作物均按其耐硼性的递减顺序排列。

示毒性，但是，当应用这样的水灌溉一个时期之后，将建立一个新的平衡，可溶性硼的含量将等于或超过灌溉水中的硼的含量。在这种情况下，必须种植更加耐硼的植物或者改良土壤。一般不主张长期使用硼含量超过3ppm的水。

b) 其他微量元素

在一些地区的井水中发现硒的含量达到了毒害水平。加里福尼亚州的少数地区井水中的锂对柑桔造成毒害的情形已有报导。天然水受铜、镍等其他有毒重金属的工业污染也可能发生。但是，在水源中仅仅存在达到毒害水平的微量元素并不足以断定此水不适用于农业，因为随着水渗入土壤，该

元素可能沉淀、被吸附或者被固定在土壤颗粒上而变成非活性的了。当前土壤中微量元素的化学资料是有限的，随着工业废水用于灌溉事业的发展而增加了对这类资料的需要。关于各种微量元素在灌溉水中的最大允许值的指标，最近已为美国水质委员会所制定[布朗逊(Brahson)等, 1975]，列于表II-2。

表 II-2 灌溉水中微量元素的最大允许浓度的推荐值*

元 素	连续用于 各类土壤 的水 (毫克/升)	在 pH 值为 6.0~8.5的 细质地土壤 中使用达 20 年 (毫克/升)	元 素	连续用于 各类土壤 的水 (毫克/升)	在 pH 值为 6.0~8.5的 细质地土壤 中使用达 20 年 (毫克/升)
铝	5.0	20.0	铁	5.0	20.0
砷	0.10	2.0	铅	5.0	10.0
铍	0.10	0.50	铯	2.5	2.5①
硼	0.75	2.0~10.0	锰	0.20	10.0
镉	0.010	0.050	钼	0.010	0.050②
铬	0.10	1.0	镍	0.20	2.0
钴	0.050	5.0	硒	0.020	0.020
铜	0.20	5.00	钒	0.10	1.0
氟	1.0	15.0	锌	2.0	10.0

* 这些值一般说来对植物或土壤不会产生不利的影响。汞、银、锡、钛、钨没有可提供的资料。

①对于柑桔，最大浓度推荐值为0.75毫克/升。

②只适合于细质地酸性土壤或含有相当高氧化铁的酸性土壤。

3. 浊度

悬浮固体颗粒所产生的浊度使灌溉水的利用受到限制。固体颗粒可引起配水系统特别是喷头和滴头的阻塞，还会影响土壤的透气性和透水性。因此，需要有清除沉积物的专门设备。

(三) 由化学组成导出的溶液参数

仅有各种阳离子在灌溉水中的绝对浓度值并不足以评价其潜在危害，更重要的是考虑由于土壤从水中吸收钠，将使土壤交换性钠百分数（ESP）增长到什么程度。这种增长取决于溶液中可溶性钠对两价阳离子的比值。比值越大，碱化的危险越大。在一给定的阳离子含量下，当存在重碳酸根时，土壤碱化的危险就增加了。与土壤特性有关的溶液参数将叙述于下面各节。

1. 钠吸附比（SAR）

已经提出过许多表达交换性阳离子和可溶性阳离子之间平衡分配的公式。土壤中含有各种类型阳离子交换物质的混合物，至少涉及四种阳离子。因此，从理论上严格地论述离子分配是很困难的，但是利用经验公式却获得相当的成功。当土壤用含有一价及两价阳离子的盐溶液进行冲洗直至达到平衡时，在交换性的一价阳离子对二价阳离子浓度之比（ESR=交换性钠比）与溶液中一价阳离子对二价阳离子浓度平方根之比（SAR）之间存在着线性关系。

$$ESR = a + k(SAR) \quad (II-4)$$

式中 a 和 k 对一给定土壤均为经验常数，ESR 为交换性钠比值，由下式得出：

$$ESR = \frac{[Na]}{[Ca + Mg]} = \frac{[Na]}{[CEC - Na]} \quad (II-5)$$

此处 $[Na]$ 和 $[Ca + Mg]$ 为交换性离子的浓度，CEC 为阳离子交换量，均以毫克当量/100克土表示。SAR 为钠吸附比，由

下式得出:

$$\text{SAR} = \frac{(\text{Na})}{\sqrt{\frac{(\text{Ca} + \text{Mg})}{2}}} \quad (\text{II-6})$$

式中 (Na) 和 (Ca+Mg) 为可溶性离子的浓度, 以毫克当量/升表示。

对美国西部大量土壤样品进行分析 (理查兹, 1954) 后导出的经验方程为

$$\text{ESR} = -0.0126 + 0.01475(\text{SAR}) \quad (\text{II-7})$$

并绘成图II-4。如果要更精确地估算交换性钠比值, 则应通过试验分别确定每一种土壤的 a 和 k 值。

以色列的六种不同土壤的 k 值在 0.0072 至 0.0169 之间 (图II-5)。

根据方程式 (II-7), 土壤的ESP和灌溉水的 SAR 的列线图示于图II-6。

只要求得灌溉水的 SAR 与土壤水平衡结果的 SAR 值 (SAR_s) 的关系, 那么, 灌溉水的 SAR 就可用来作为碱化危害的一种度量指标。由于蒸发和根的吸收作用, 使土壤溶液的浓度增大了, 从根层排出来的水其浓度可能达灌溉水的二至十倍, 这取决于灌水频率和总灌水量 (见第 IV 章)。但在主根层 (大约 50cm 深) 中, 土壤溶液的平均浓度一般不会超过灌溉水的两或三倍。

如果不计入盐分的沉淀或溶解、矿物的风化作用和植物对盐分的吸收等影响, 则很明显, 灌溉水进入土壤中会变得更浓, 但不会改变相对的组成, 即可溶性钠的含量百分数不会变化。但是, SAR 值却与总浓度的平方根成正比例的增加。因此, 如果总浓度加一倍, 则 SAR 值将增长到 1.41 倍;