

XI AN SHUI GU AN G AI

咸水灌溉

资 源 环 境 与 发 展 研 究 丛 书

主 编 郑九华

副主编 于开芹 张立河



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

资 源 环 境 与 发 展 研 究 丛 书

咸水灌溉

主 编 郑九华

副主编 于开芹 张立河

内 容 提 要

本书为资源环境与发展研究丛书之一，它在国内外咸水灌溉研究的基础上，并结合相关试验，系统地论述了咸水的物质组成、形成与特性，我国咸水资源的分布与特性，咸水灌溉的必要性与可行性分析，咸水灌溉的影响因素，咸水灌溉的综合效应，咸水灌溉的监测预报与数值模拟，咸水灌溉的管理与实施策略以及咸水利用的试验研究等内容，以便为咸水灌溉的发展和应用提供理论基础和实践经验。

本书可供水利、水资源管理、环境工程、农业科学等专业的教师、学生和工程技术管理人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

咸水灌溉 / 郑九华主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2010.10

（资源环境与发展研究丛书）

ISBN 978-7-5084-7931-6

I. ①咸… II. ①郑… III. ①咸水灌溉 IV.
①S274

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第183883号

书 名	资源环境与发展研究丛书 咸水灌溉
作 者	主编 郑九华 副主编 于开芹 张立河
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 8.625印张 232千字
版 次	2010年10月第1版 2010年10月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	26.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

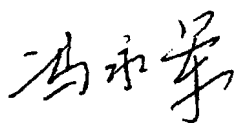
在人类社会进入 21 世纪的今天，随着全球经济的快速发展和人口数量的持续增长，资源、环境与发展的矛盾日益突出，资源瓶颈和环境容量的制约愈发严重，循环经济和可持续发展呼声日高，因此资源、环境与发展的研究逐渐成为关系到社会进步的重要课题。

我国物质资料消耗的增长高于国民经济的增长，淡水资源匮乏、水污染状况恶化、土地退化、水土流失加剧、矿产资源储采比下降和利用率低下等问题已经严重影响到人民生活水平的提高，影响到社会经济的可持续发展。进入 21 世纪以来，我国工业化和城市化进程加快对资源环境的压力进一步加大，以石油进口为核心的能源安全问题突出地摆到了我们的面前，环境污染由城市向农村转移，由东部向西部转移，环境质量“局部改善、整体下降”的趋势在近期内还难以得到根本性的转变。

基于我国的资源家底和环境容量，我们不能走高能耗、高污染的老路，只能建立资源节约型、质量效益型的国民经济体系，只能建立节约型的社会。2005 年，我国政府提出了“建设环境友好型社会”的构想，“建设生态文明，基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式”作为我国全面建设小康社会的基本要求。

多年来，我们以资源环境与发展为中心，就水资源的开发利用和保护、土地退化与治理、固体废弃物的综合利用、重金属污染的植物修复、城市化和旅游经济开发对生态环境的影响

和土地管理与保护等多个专题问题进行了深入的研究和探讨，取得了一定的成果。为了能对我国的国民经济发展和社会进步略尽绵薄之力，也阶段性地总结前期的研究成果，特编写了这套“资源环境与发展研究丛书”。

A handwritten signature in black ink, reading '冯永军' (Feng Yongjun). The characters are written in a fluid, cursive style.

2010年5月

前言

我国水资源总量居世界第 6 位，人均占有量为 2240m^3 ，约为世界人均占有量的 $1/4$ ，在世界银行统计的 153 个国家中居第 88 位，而且地区分布不均，年内年际分配不均，利用效率低，旱涝灾害频繁，地下水开采过量，污染严重。特别是近 10 年来，我国降水连年偏少，旱灾频发。仅以 2008 年底至 2009 年 2 月这段时间为例，我国遭遇了 30 年一遇（重旱区为 50 年一遇）的严重旱灾，截至 2009 年 2 月 5 日，全国作物受旱面积 1.55 亿亩，有 429 万人、207 万头大牲畜因旱发生饮水困难，其中冬小麦主产区受旱面积 1.43 亿亩，重旱 4635 万亩，干枯 116 万亩，我国首次启动 I 级抗旱应急响应。这次旱灾对我国水资源的供需问题提出了极为严峻的挑战。在我国，农业是用水大户，耗水量占总用量的 $70\%\sim 80\%$ ，解决好农田灌溉水源问题会对缓解水资源危机起着至关重要的作用。

在我国的许多地区，特别是华北、西北及滨海地区，分布着大量的咸水和微咸水资源，这部分水资源远未得到很好的开发。所以开发利用咸水和微咸水资源是解决我国水资源供需矛盾的一条重要途径。按照传统观念，咸水和微咸水属于劣质水资源，是阻碍农业发展的有害因素之一。但是由于土壤对水中盐分具有不同程度的缓冲作用，作物也都具有一定的耐盐能力，只要采取适当的措施，利用咸水灌溉作物，达到抗旱增产的目的，是完全可能的。因此，合理开发利用咸水和微咸水资源，增辟灌溉水源，研究咸水和微咸水灌溉的土壤生态效应、增产效益及其配套措施，对解决水资源危机和指导农业生产具

有重大意义。

关于咸水、微咸水灌溉以及土壤、水分、盐分和作物的关系一直是国际上非常活跃的研究领域。美国、以色列、前苏联、印度、突尼斯、意大利、澳大利亚以及西非、北非、中亚的许多国家和地区，对咸水和微咸水利用都有较多的研究，其范围涉及谷类作物、糖、纤维、油料作物以及蔬菜、水果、树木和牧草等各种植物。近年来，我国有关科研单位，在宁夏回族自治区的宁南山区和银川平原，甘肃省民勤地区，山东省陵县，河北省的南皮、曲周、盐山等县，江苏省东台县和射阳县，天津市南郊及静海县等地进行了咸水灌溉、排咸补淡和井排改良盐碱土的试验，取得许多科研成果。综观国内外有关文献，关于微咸水灌溉的研究大致可分为两类：一类集中于咸水灌溉和土壤之间的相互作用，旨在研究在不同矿化度的咸水灌溉下土壤中的水盐运动规律；另一类则集中于作物耐盐生理，主要研究作物对盐分的抵抗、吸收及其在作物体内的转移和积累。这些都为咸水灌溉的发展和应用提供了坚实的基础。

咸水灌溉具有双重效应：一方面给土壤带来盐分，措施不当还会使土壤次生盐渍化，影响作物生长；另一方面能增加土壤水分，降低土壤溶液浓度，有利于作物根系对水分的吸收。所以咸水灌溉应当走持续发展的道路，采取适宜的物理、化学、生物和农田管理措施，在保证土壤质量、避免土壤退化和土地生产力水平下降以及不造成农业生态环境恶化的前提下，最大限度地利用咸水和微咸水资源，在避免或减轻对作物危害的同时，获得较高的经济效益；同时，咸水灌溉还能节约淡水资源，对国民经济的发展起到一定的促进作用，具有良好的社会效益。

影响咸水灌溉的因素有很多，如咸水水质、作物耐盐性、土壤肥力与理化性质、灌溉方式、田间管理措施、气候地形以及当地的社会经济条件等。因此，咸水灌溉是一项系统工程，需要综

合考虑各种影响因素，有计划、有目的、有步骤地实施。灌溉前要进行科学的背景调查和可行性分析，灌溉时要有合理的配套措施，灌溉后要有必要的监测系统和预报机制，力争将咸水灌溉的不良影响降到最低限度。

本书在国内外咸水灌溉研究的基础上，并结合自己的相关试验，系统地论述了咸水的物质组成、形成与特点，我国咸水资源的分布与特性，咸水灌溉的必要性与可行性分析，咸水灌溉的影响因素，咸水灌溉的综合效应，咸水灌溉的监测预报与数值模拟以及咸水灌溉的管理与实施策略等内容，以便为咸水灌溉的发展和应用提供理论基础和实践经验。

参加本书编写工作的有：山东垦利黄河河务局闫宝柱（第1章和第3章）、刘广生（第2章）、马龙（第4章）、山东农业大学水利土木工程学院郑九华（第5章和第7章）、山东黄河河口管理局张立河（第6章）和山东农业大学资源与环境学院于开芹（第8章）。全书由郑九华任主编，于开芹和张立河任副主编，由山东农业大学资源与环境学院冯永军教授主审。

本书在编写过程中，得到了山东黄河河务局和山东农业大学资源与环境学院与水利土木工程学院的领导、老师们的支持和帮助。感谢冯永军教授、东野光亮教授、张治国教授、聂俊华教授、包济美老师提出了许多宝贵的建议和意义，感谢研究生王兆锋、袁秀杰和李玉梅、刘可军同学所做的大量工作，同时还要感谢中国水利水电出版社的编辑老师的大力支持和关心。

由于编者工作经验、学术水平和能力所限，书中难免的不足之处，敬请同行专家及读者批评指正。

编者

2010年7月

目 录

序

前言

1 咸水的物质组成、形成与特性	1
1.1 咸水的概念与物质组成	1
1.2 咸水的形成机制	9
2 我国咸水资源的分布与特性	17
2.1 华北平原区	20
2.2 松辽平原区	30
2.3 黄河中游黄土区	33
2.4 西北干旱区	37
2.5 长江三角洲滨海区	49
3 我国咸水灌溉的必要性与可行性分析	58
3.1 我国的水资源现状分析	58
3.2 国外咸水灌溉的研究概况	64
3.3 我国咸水灌溉的研究概况	76
4 咸水灌溉的影响因素	84
4.1 咸水灌溉的水质评价	84
4.2 植物的耐盐性研究	93
4.3 灌溉方式和灌溉制度	112
4.4 土壤性质	116
5 咸水灌溉的综合效应	119
5.1 土壤效应	119
5.2 作物效应	132

5.3 环境效应	150
6 咸水灌溉的监测预报与数值模拟	153
6.1 咸水灌溉的背景调查与水盐运动监测	153
6.2 土壤水盐运动的基本理论	155
6.3 咸水灌溉的土壤水盐运动数值计算方法	180
7 咸水灌溉的管理与实施策略	206
7.1 做好土壤水盐运动监测和预报工作	206
7.2 灌溉管理	209
7.3 加强盐分冲洗和农田排水管理	215
7.4 采用覆盖措施调节土壤水盐运动	216
7.5 选育耐盐作物或品种	218
7.6 调整作物种植方式	219
7.7 增施有机肥或添加剂	220
7.8 平整土地与及时中耕	222
8 咸水利用的试验研究	223
8.1 咸水处理对玉米、棉花发芽和出苗的影响	224
8.2 秸秆覆盖条件下咸水灌溉棉花试验研究	229
8.3 秸秆覆盖条件下咸水灌溉水盐运移的数值模拟	249
参考文献	256

咸水的物质组成、形成与特性

1.1 咸水的概念与物质组成

1.1.1 咸水的概念

在大自然的水分循环中，水经常与大气、土壤、岩石及生物体接触。在运动过程中，水把大气、土壤、岩石中的许多物质溶解或挟持，使其共同参与了水分循环，成为一个极其复杂的体系。这些物质中，除了少量的悬浮物质颗粒和气体分子外，主要是可溶性盐类。咸水就是指含有不同种类和数量的含盐水，是相对于淡水而言的。从这个角度上说，自然界中的水都是咸水。在日常应用和科学研究中，当水中的盐分含量较少时称为淡水，当水中的盐分含量超过一定数值时则统称为咸水。

通常用矿化度来表示水中的盐分含量，并利用矿化度进行含盐水的分类。矿化度是指水中各种可溶性盐的总量，常用单位为 g/L 或 mg/L 。关于含盐水矿化度分类标准的研究很多，由于研究目的和应用范围的不同也不完全一致。就农田灌溉而言，一般认为矿化度小于 2g/L 的为淡水， $2\sim 5\text{g/L}$ 的为微咸水， $5\sim 10\text{g/L}$ 的为咸水， $10\sim 50\text{g/L}$ 的为盐水，大于 50g/L 的为卤水。

咸水大致有以下几个来源：①地下水；②海水；③咸水湖；④农田排水或灌溉回归水；⑤主要成分为盐碱类物质的工业废水。就目前的技术和经济条件而言，矿化度大于 10g/L 的含盐水是不能直接用于农田灌溉的，在内陆地区可供开采的咸水或微咸水资源为埋深在 $0\sim 200\text{m}$ 的中浅层地下水。因此本书中的咸水是指矿化度小于 10g/L 的地下水，有时也包括一些低矿

化度的碱性地下水和灌溉回归水。

1.1.2 咸水的离子组成、来源与特性

咸水的化学成分一般可分为五大类：离子、溶解气体、生物生成物、微量元素和放射性元素。以下内容主要介绍咸水的离子组成和盐分组合。

咸水中分布最广、含量较多的离子有 8 种，其中阴离子有 4 种：氯离子 (Cl^-)、硫酸根离子 (SO_4^{2-})、碳酸根离子 (CO_3^{2-}) 和重碳酸根离子 (HCO_3^-)；阳离子有 4 种：钙离子 (Ca^{2+})、钠离子 (Na^+)、钾离子 (K^+) 和镁离子 (Mg^{2+})，合称 8 大离子，其总量占溶解质总量的 95%~99% 以上。构成这种离子分布的原因，是因为这些离子的元素在地壳中的含量高，且易溶于水，如 O、Ca、Mg、Na、K 元素；有些元素虽然在地壳中含量不很大，但它容易溶于水，如 Cl 元素和以 SO_4^{2-} 形式出现的 S 元素。而 Si、Al、Fe 等元素虽然在地壳中含量很高，但很难溶于水，在地下咸水中的含量并不高。

咸水中的主要离子成分，随咸水矿化度的变化而改变。这种变化主要与不同盐类在水中的溶解度有关。通常，低矿化度水（矿化度小于 1g/L）中以 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主，中矿化度水（矿化度一般为 1~3g/L）中阴离子以 SO_4^{2-} 为主，阳离子以 Na^+ 或 Ca^{2+} 为主；高矿化度水（矿化度大于 3g/L）中阴离子以 Cl^- 为主，阳离子以 Na^+ 为主。下面依次来说明咸水中各种离子的来源与特性。

1.1.2.1 氯离子 (Cl^-)

Cl^- 主要来源于：①沉积岩中的含盐和含氯化物的溶解；②岩浆岩中的含氯矿物，如氯磷灰石 ($\text{Ca}_5 [\text{PO}_4]_3 \text{Cl}$)、方钠石 ($\text{Na}_8 [\text{AlSiO}_4]_6 \text{Cl}_2$) 的风化分解；③残留海水；④火山喷发物的溶滤；⑤人为因素（如工业污水、生活污水和人畜粪便的污染等）。

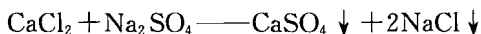
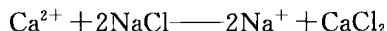
Cl^- 不会被植物和细菌摄取，也不会被土壤颗粒吸附，而且

氯盐的溶解度很大，不易析出，是咸水中最稳定的离子。 Cl^- 含量随矿化度的增加而增高，在低矿化度水中仅每升数毫克，而在高矿化度水中可达每升数百毫克。 Cl^- 含量通常可说明咸水的矿化度，同时它也是判别污水是否污染水体的标志性离子。

1.1.2.2 硫酸根离子 (SO_4^{2-})

SO_4^{2-} 主要来源于：①含硫酸钙的地层，如分布在我国西北地区的新第三系和老第三系地层，水将硫酸钙 (CaSO_4) 溶解，使 SO_4^{2-} 进入到地下咸水中；②煤系地层，其中常含有很多黄铁矿，在流经这类地层的地下水中的离子往往以 SO_4^{2-} 为主，在金属硫化物矿床附近的地下水中也常含有很高的 SO_4^{2-} ；③煤燃烧后向大气中排放大量的二氧化硫 (SO_2) 及其他的氮氧化合物，这些物质氧化并吸水后，构成硫酸往往形成酸雨，如我国西南地区，由于这里的煤含硫量高，是酸雨的多发地；④人为因素（如工业废水废渣、生活污水和人畜粪便的污染等）。

SO_4^{2-} 在咸水中的含量变化很大，从每升几十毫克到几十克。一般 SO_4^{2-} 的含量随矿化度的增大而增加，特别是在硫酸钠 (Na_2SO_4) 存在时其含量更高。温度的变异和氯化钠的浓度也会影响 SO_4^{2-} 含量。当温度增高时，硫酸盐的溶解度增大，水中 SO_4^{2-} 的含量也随着增加。在氯化钠 (NaCl) 含量高的咸水中，硫酸盐的浓度最低，相反，当水中 NaCl 减少时，硫酸盐的浓度则相对增大，这是由于硫酸盐在 NaCl 作用下，硫酸盐在不断地转变为溶解度不大的化合物 CaSO_4 的结果，其反应式为



SO_4^{2-} 的含量仅次于 Cl^- ，可达每升数十克，特别是在中矿化度水中， SO_4^{2-} 常成为含量最多的离子。

1.1.2.3 重碳酸根离子 (HCO_3^-) 和碳酸根离子 (CO_3^{2-})

HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的含量代表着咸水的总碱度，它们之间可以

互相转化 ($2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$)，其主要来源为：①含碳酸盐岩的沉积岩溶解，如 $\text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$ 等；②变质岩地区铝硅酸盐矿物的风化溶解，如 $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}$ (钠长石) + $2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + 2\text{Na}^+ + \text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9 + 4\text{SiO}_2$ 和 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ (钙长石) + $2\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} + \text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$ 等；③工业废水，其中化工、印染、电镀、仪表、建材和造纸业的 50%~100% 的工厂废水均会有大量的烧碱 (NaOH) 和纯碱 (Na_2CO_3)。

地下咸水中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量一般不超过每升数百毫克，它们几乎总是存在于低矿化度的碱性水中。 HCO_3^- 在咸水中常常与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 伴存，构成重碳酸盐水。在咸水中通常不存在 CO_3^{2-} ，偶尔有 CO_3^{2-} 存在时，含量也不高，只有在碳酸钠水中含量才较高。从形成与演化情况看，在咸水形成初期，矿化度较低时，含有大量 HCO_3^- ，这是由于这一阶段，水中有碱金属、碱土金属的重碳酸盐存在以及缺少石膏溶液的缘故。随着矿化度的增高，石膏溶解于水中后， HCO_3^- 离子便与 Ca^{2+} 形成沉淀而析出。

1.1.2.4 碱金属离子——钠离子 (Na^+) 和钾离子 (K^+)

它们的盐类在水中都是容易溶解的，主要来自沉积岩内盐类或其他矿物的风化溶解 (如钠长石和钾长石等)，还可来自某些工业废水。由于它们性质相近，常常合在一起测定。

Na^+ 在咸水中变幅很大，从基本上为零到数千毫克每升，通常在低矿化度水中，含量很少，而在高矿化度水中最高可达每升数十克。 Na^+ 常与 Cl^- 伴存，和 SO_4^{2-} 很少共存，与 HCO_3^- 共存更少。在 CO_2 和 H_2O 的参与下，形成低矿化度的含 Na^+ 和 HCO_3^- 的地下咸水；由于 Na_2CO_3 在水中的溶解度很大，当阳离子以 Na^+ 为主时，常形成 HCO_3^- 含量很高的苏打水。一般 Na^+ 含量和 Cl^- 含量有一致趋向，只有在地下水盐分很高 (大于 20g/L) 时，其浓度的增长幅度小于 Cl^- ，这是由于水中 Mg^{2+}

累积的缘故。在地下水盐分最低情况下， Na^+ 含量常常小于 Ca^{2+} 含量，这时是碳酸盐—硫酸盐水阶段。

由于 K^+ 大量参与形成不溶于水的矿物，如水云母、蒙脱石、绢云母等，并易被植物摄取，在咸水中 K^+ 含量一般远远低于 Na^+ 含量，当 Na^+ 不超过 10mg/L 时， K^+ 只有 Na^+ 的 $1/10 \sim 1/2$ 。

碱金属离子过多的咸水灌溉农田，会导致土壤的物理性质恶化而危害作物。

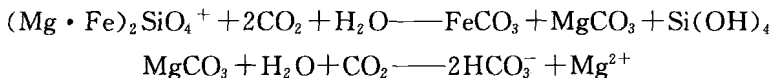
1.1.2.5 钙离子 (Ca^{2+})

Ca^{2+} 主要来自石灰岩及其矿物的风化溶解，在咸水中其含量随矿化度的增高而增多。 Ca^{2+} 是低矿化度咸水中的主要阳离子，其一般含量不超过数百毫克每升；在高矿化度咸水中，由于阴离子以 Cl^- 为主，且 CaCl_2 的溶解度较大，故含有较多的 Ca^{2+} ，但通常低于 Na^+ 含量。它对土壤和作物的危害主要决定于咸水中的盐分组合形式。当水中出现 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 时，咸水常因 CaCO_3 和 CaSO_4 盐类沉淀，导致水中 Ca^{2+} 浓度下降。当咸水中 Na^+ 浓度比大于 1.5 时，将大大提高难溶性钙盐的溶解度，其反应式为 $\text{CaSO}_4 \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ ，其中参加反应的若为 MgCl_2 ，则反应加速；在咸水中有 MgSO_4 存在，则上述反应过程减弱，钙的溶解减少。

在咸水形成的早期阶段， Ca^{2+} 的含量常常超过 Mg^{2+} 和 Na^+ 的浓度，并随着总含量的增长显著地提高，但是钙盐在大多数情况下很快就达到溶液的饱和点。

1.1.2.6 镁离子 (Mg^{2+})

Mg^{2+} 来源于含镁硅酸盐的沉积盐（如白云岩和泥灰岩）和岩浆岩以及变质岩中含镁矿物的风化溶解，其反应式为



咸水盐分浓度很低和中度阶段时， Mg^{2+} 的含量少，影响 Mg^{2+} 进入和累积在水中的主要因素是由于 Mg^{2+} 存在于地下水

中的底土的胶体部分，以非交换性的固着作用形成镁的硅酸盐或形成白云石。当地下水浓度很高时，水中出现大量的钠，它与被附着的 Mg^{2+} 发生代换作用，造成 Mg^{2+} 在水中超过 Ca^{2+} 的含量。因为在地壳中镁元素比钙少且它们性质相近，故咸水中 Mg^{2+} 含量通常低于 Ca^{2+} 。 Mg^{2+} 的离子半径比 Ca^{2+} 小，故其电场强度大、吸水力强、水化度高。 Mg^{2+} 的四周共有六个水分子，因此其水膜比 Ca^{2+} 的厚。由于水膜较厚，故水化镁均以 $Mg(H_2O)$ 表示，常以络合物的形式出现，如 pH 值大于 10 时常出现 $MgO-H^+$ 。当 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 大于 1000mg/L 时，在咸水中有可能出现 $MgHCO_3$ 和 $MgHSO_4$ 等络合离子。

咸水中过多的 Mg^{2+} 随灌溉进入农田，这将增强对土壤物理性质的破坏。

1.1.3 咸水的盐分组成与特性

咸水中的主要阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和阴离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 相互结合可生成 12 种盐类，如表 1-1 所示。表中的钠盐均有害，其危害顺序为 $Na_2CO_3 : NaHCO_3 : NaCl : Na_2SO_4 = 10 : 3 : 3 : 1$ 。但钙盐和镁盐中只是在横线以下的才有害，横线以上的对土壤和作物没有多大的危害。

除去难溶于水的 $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 和在水中溶解度很低的 $CaSO_4$ ， $Ca(HCO_3)_2$ 和 $Mg(HCO_3)_2$ 会很快地转化为 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 在水形成沉淀 $[Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O + CO_2 \uparrow$ 或 $Mg(HCO_3)_2 \longrightarrow MgCO_3 \downarrow + H_2O + CO_2 \uparrow]$ ，因此在一般条件下在咸水灌溉中有害的共有七种盐类，即 Na_2CO_3 （纯碱）、 $NaHCO_3$ （小苏打）、 Na_2SO_4 （芒硝）、 $NaCl$ （食盐）、 $CaCl_2$ 、 $MgCl_2$ （盐卤）和 $MgSO_4$ （泻盐），其危害顺序从大到小为 Na_2CO_3 、 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 、 $NaHCO_3$ 、 $NaCl$ 、 $MgSO_4$ 、 Na_2SO_4 。

表 1-1 咸水中的 12 种盐类

	Na_2CO_3	$MgCO_3$	$CaCO_3$	
	$NaHCO_3$	$Mg(HCO_3)_2$	$Ca(HCO_3)_2$	
有害	Na_2SO_4	$MgSO_4$	$CaSO_4$	无害
	$NaCl$	$MgCl_2$	$CaCl_2$	

咸水中的离子态物质，在灌溉农田过程中会因 H_2O 和 CO_2 不断地丧失，阴阳离子会按等当量的化合形成不同的盐类，盐类会根据自身的溶解度的大小按顺序组合。在盐类组合过程中各盐类之间的盐交换和拮抗作用也参与影响。不同盐类的溶解度列入表 1-2 中，为便于计算其化合物的分子量和当量也列入表 1-2 中。

表 1-2 各离子当量和不同盐类的溶解度、分子量与当量 (20℃)

盐类	溶解度 (g/L)	分子量	盐类当量	离子	离子当量
CaCO_3	4.8×10^{-3}	100.09	54.04	K^+	33.102
CaSO_4	2.02	136.15	68.08	Na^+	22.990
NaHCO_3	96.0	84.0	84.0	Ca^{2+}	20.040
$\text{Ca}(\text{Mg})(\text{HCO}_3)_2$	166	162.12	81.06	Mg^{2+}	12.156
Na_2CO_3	215	105.99	52.99	—	—
NaCl	360	58.44	58.44	—	—
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	440	142.04	71.02	Cl^-	35.453
MgSO_4	445	120.37	60.19	SO_4^{2-}	48.030
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	545~575	95.13	47.62	CO_3^{2-}	30.005
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	744	110.99	55.50	HCO_3^-	61.017
NaNO_3	880	84.95	84.95	—	—

在盐类的重新组合过程中，其组合的先后顺序会因溶解度的大小和反应特点而变化。溶解度或反应过程中易产生沉淀的首先结合析出，而溶解度大的最后结合。因此盐类的组合顺序是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 首先与 HCO_3^- 结合形成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ， $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 进一步迅速脱水沉淀出 CaCO_3 和 MgCO_3 。剩余的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与水中的 Na^+ 再与 SO_4^{2-} 形成硫酸盐，最后才是 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的氯化物。由于咸水中不存在低溶解度的 CaCO_3 和 MgCO_3 ，故只要咸水中出现 CO_3^{2-} ，就必然与水中的 Na^+ 结合形成强碱的 Na_2CO_3 。所以，在咸水灌溉的过程中，盐类的组合的实际顺序是： $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 、 CaSO_4 、 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 、 Na_2SO_4 、