DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.036
李金刚，何平如，陈菁，等. 灌溉水盐分组成对番茄生长及土壤盐碱的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):423-436.
LI Jingang, HE Pingru, CHEN Jing, et al. Effects of irrigation water salt compositions on tomato growth and soil salinization[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):423-436.

灌溉水盐分组成对番茄生长及土壤盐碱的影响

李金刚[1]，何平如[1]，陈 菁[1]，张 娜[2]，杜 斌[2]，刘 闯[1]，周明强[3]
(1.河海大学农业科学与工程学院,南京 210098;2.宁夏水利科学研究院,银川 750021;
3.新疆生产建设兵团河湖与水文水资源中心,乌鲁木齐 830002)

摘　要:[**目的**]为探究适宜于干旱、半干旱区番茄大田栽培的灌溉水盐度和盐分组成。[**方法**]在宁夏银北灌区开展 3 年番茄膜下滴灌野外田间试验,设置 3 种不同盐分浓度(1,2,3 g/L)和 5 个 Na∶Ca 摩尔浓度比(1,3,5,7,9)的灌溉水源。[**结果**]在较低的灌溉水盐度(1 g/L)下,适当增加灌溉水 Na∶Ca 摩尔比有利于番茄植株的干物质和氮磷钾素积累;番茄单果重、商品果产量和总产量随灌溉水 Na∶Ca 摩尔比增加而线性下降,且灌溉水 Na∶Ca 摩尔比每增加 1,番茄商品果产量下降 5 761.7～6 036.7 kg/hm^2;"高盐度(2,3 g/L)、低 Na∶Ca 摩尔比(1,3)"的灌溉水较"低盐度、高 Na∶Ca 摩尔比"的灌溉水,更有利于番茄增产;膜内表层 40 cm 土壤钠吸附比和表层 100 cm 土壤积盐量随灌溉水 Na∶Ca 摩尔比的增加线性增加。[**结论**]为在宁夏银北灌区大田栽培番茄生育期内减少积盐并获得相对高产,推荐土壤基质势控制下限－20 kPa 下膜下滴灌的适宜灌溉水盐度为 2 g/L 且 Na∶Ca 摩尔浓度比为 5。

关键词:微咸水;膜下滴灌;干物质;商品果产量;钠吸附比
中图分类号:S287;S275　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1009-2242-(2024)02-0423-14

Effects of Irrigation Water Salt Compositions on Tomato Growth and Soil Salinization

LI Jingang[1], HE Pingru[1], CHEN Jing[1], ZHANG Na[2], DU Bin[2], LIU Chuang[1], ZHOU Mingqiang[3]
(1.*College of Agricultural Science and Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*;
2. *Institute of Water Resources Research of Ningxia Hui Autonomous Region*, *Yinchuan* 750021, *China*; 3. *River*, *Lake*, *Hydrology and Water Resources Center of Xinjiang Production and Construction Corps*, *Urumqi* 830002, *China*)

Abstract:[**Objective**] To explore the optimal salt composition and salt concentration of irrigation water suitable for tomato field cultivation in arid and semi-arid areas. [**Methods**] Three salinity levels (1, 2, and 3 g/L) and five Na∶Ca molar concentration ratio levels (1, 3, 5, 7, and 9) of irrigation water were used in a 3-year field experiment of drip irrigation under tomato film in Yinbei irrigation district of Ningxia, China. [**Results**] The experiment found that with lower irrigation water salinity (1 g/L), appropriate increases in the Na∶Ca molar ratio of irrigation water were beneficial for the accumulation of tomato plant dry matter and nutrients. Tomato fruit weight, marketable yield, and total yield decreased linearly with the increase of irrigation water Na∶Ca molar ratios. Moreover, with each increase in Na∶Ca molar ratio of irrigation water, the tomato marketable yield decreased by 5 761.7 to 6 036.7 kg/hm^2. Irrigation water with "high salinity (2, 3 g/L) and low Na∶Ca molar ratio (1 and 3)" was more profitable for tomato yield increase than irrigation water with "low salinity and high Na∶Ca molar ratio". The soil sodium adsorption ratio in 0—40 cm and the amount of soil salt accumulation in 0—100 cm increased linearly with the increase of irrigation water Na∶Ca molar ratio. [**Conclusion**] To alleviate the soil salt accumulation and obtain a relatively high fruit yield during the growth period of field cultivated tomatoes in Yinbei irrigation area of Ningxia, irrigation water with salinity of 2 g/L and Na∶Ca molar concentration ratio of 5 was recommended for mulched drip

收稿日期:2023-10-01　　**修回日期:**2023-11-07　　**录用日期:**2023-12-11　　**网络首发日期**(www.cnki.net):2024-03-06
资助项目:国家自然科学基金青年项目(52309046);中央高校基本科研业务费专项(B230201053);河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室开放研究基金项目(HAKF202102)
第一作者:李金刚(1990—),男,博士后,主要从事微咸水灌溉、高效灌排理论与技术研究。E-mail:lijingang68@163.com
通信作者:何平如(1994—),女,博士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:hepingru68@163.com

irrigation, under the control limit of soil matrix potential at −20 kPa.

Keywords: saline water; mulched drip irrigation; dry matter accumulation; marketable yield; sodium adsorption ratio

Received: 2023-10-01 **Revised**: 2023-11-07 **Accepted**: 2023-12-11 **Online**(www.cnki.net): 2024-03-06

在干旱半干旱农业区,农田灌溉对作物生长和产量起着至关重要的作用[1]。通常为了实现作物稳产高产,需要通过补充灌溉的方式维持农田适宜的水分状态,以满足作物在生长期间对水分的需求[2]。然而,由于水资源的时间和空间分布不均、环境污染等,干旱、半干旱农业区的淡水资源严重短缺,长期以来一直威胁着区域农业生产的可持续发展。为了充分保障粮、油、棉、糖、蔬菜的市场供应,需要开发非常规水资源代替淡水资源用于农田灌溉[3]。

作为一种常见的非常规水资源,微咸水应用于农田灌溉已有数百年历史[4-5]。开发利用浅层地下微咸水进行农田灌溉,不仅有利于补充农业生产所需水分,还有利于区域地下水的更新[6]。通常微咸水灌溉可以提供作物生长所需的大部分水分和部分微量元素[7],有利于促进植株生长、提高作物产量和提升籽粒或果实的品质[8]。然而,不适宜的微咸水质可能携带大量的盐分离子进入农田表层土壤,导致作物根区土壤溶液渗透势下降、植株离子失衡以及植株细胞中特定离子毒性(如 Na^+、SO_4^{2-} 和 Cl^-),对农作物生长发育和产量形成不良影响[9-11]。大量研究[9-10]发现,不合理的微咸水灌溉对作物形成的不利影响包括延迟出苗时间、降低出苗率、减弱净光合作用强度、降低植物中酶的活性、减弱根系对营养物质的吸收能力[12]等,对农田土壤的不良影响包括根区土壤微生物数量和活性减少、土壤持水能力下降[13]、土壤有效孔隙度降低[14]等。

不仅灌溉水盐度对"土壤—作物"系统产生显著影响,灌溉水的盐分离子组成也对土壤(物理、化学和生物特性)和作物(植物生长、产量和质量)具有重要影响。一方面,K^+、Na^+ 和 Cl^- 因其离子电荷低、水合作用小、半径大等特点,对土壤胶体的吸附能力较弱,容易随水迁移;Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 对土壤胶体具有较强的吸附能力,随水运动的能力较弱。因此微咸水或咸水灌溉后土壤水分入渗过程中,土壤中的 Na^+ 和 K^+ 很容易被灌溉水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 交换[15],这不仅影响土壤中游离的离子组成和离子浓度,还影响土壤可溶性盐分的空间分布。此外,Na^+ 的积累通常导致土壤颗粒的分散和膨胀。另一方面,灌溉水中盐分离子组成对作物的影响主要体现在植株根系对土壤水分和盐分离子的选择性吸收,通常导致植物组织器官形成渗透胁迫、离子毒性(如 Na^+、SO_4^{2-}、Cl^-)和营养失衡[16-18],影响植物相关生理活动。有研究[19]表明,土壤中 Na^+ 含量升高通常对应于植株细胞渗透压高、叶绿素浓度低、二氧化碳(CO_2)有效性弱、光合作用相关酶活性低、光合作用弱、有机质积累量低和作物产量下降。植物吸收的 K^+ 通常在植物组织器官的渗透压调节中起着重要作用,尤其是 K^+ 与 Na^+ 的浓度比以及 Ca^{2+} 与 Na^+ 的浓度比通常是植物对土壤盐胁迫耐受性的重要评判指标。此外,也有研究[20]表明,番茄果实缺乏 Ca^{2+} 会引起花端腐病(BER),导致番茄栽培因坐果率下降而减产。因此,科学评价含盐灌溉水的适宜性对于农业生产中咸水/微咸水资源的安全高效利用至关重要。

本文采用野外田间试验和理论分析相结合的方法,以宁夏银北引黄灌区番茄栽培农田为研究对象,开展野外田间膜下滴灌试验,探究灌溉水不同盐分浓度下的盐分组成对番茄植株生长及土壤盐碱特性的影响,以期为合理利用区域浅层地下微咸水资源进行农田灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

野外田间试验于2017—2019年在宁夏石嘴山市平罗县交际村农场(38°51′N,106°35′E)开展。试验区地处西北干旱区,属于温带大陆性气候,降水稀少(多年平均降水量为183.4 mm),蒸发强烈(NHZF—E601型水面蒸发器测得多年平均蒸发量为1 701.7 mm),年平均相对湿度为45%,年平均气温为8.3 ℃。根据2017年试验开始前取样检测结果,试验田土壤的物理性质(质地、容重、田间持水率和孔隙度)见表1,化学特性(pH、钠吸附比、全盐、速效氮、速效磷、速效钾、K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+})见表2。研究区的土壤剖面具有明显的分层特性,根据国际土壤质地分类标准,表层40 cm为砂质壤土,40—100 cm为粉质黏土。试验田土壤 Ca^{2+} 摩尔含量约为 Mg^{2+} 摩尔含量的2倍,Na^+ 的摩尔含量约为 Ca^{2+} 摩尔含量的2倍。2017—2019年试验期间,地下水位和地下水矿化度的动态变化见图1,地下水和渠引黄河水的主要盐分离子浓度见表3,地下水的盐度和钠钙摩尔比分别为1.93 g/L和5,黄河水的盐度和钠钙摩尔比分别为0.53 g/L和3。

表 1　试验田土壤物理性质

Table 1　Soil physical properties of the experimental field

土层深度/cm	质地分类	容重/(g·cm^{-3})	田间持水率/%	孔隙度/%	粉粒/%	砂粒/%	黏粒/%
0—40	砂壤土	1.39	20	56	19	61	20
40—100	粉质黏土	1.33	17	48	27	8	65

注:砂粒、粉粒、黏粒的粒径范围分别为 0.02～2,0.002～0.02,<0.002 mm。

表 2　试验田土壤化学性质

Table 2　Soil chemical properties of the experimental field

土层深度/cm	pH	土壤钠吸附比	全盐含量/(g·kg^{-1})	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	K^+浓度/(mmol·kg^{-1})	Na^+浓度/(mmol·kg^{-1})	Ca^{2+}浓度/(mmol·kg^{-1})	Mg^{2+}浓度/(mmol·kg^{-1})
0—40	8.54	3.47	1.47	51.10	8.20	254.50	1.85	9.17	4.62	2.11
40—100	7.81	3.27	1.22	47.97	3.35	123.50	3.22	6.45	3.13	1.62

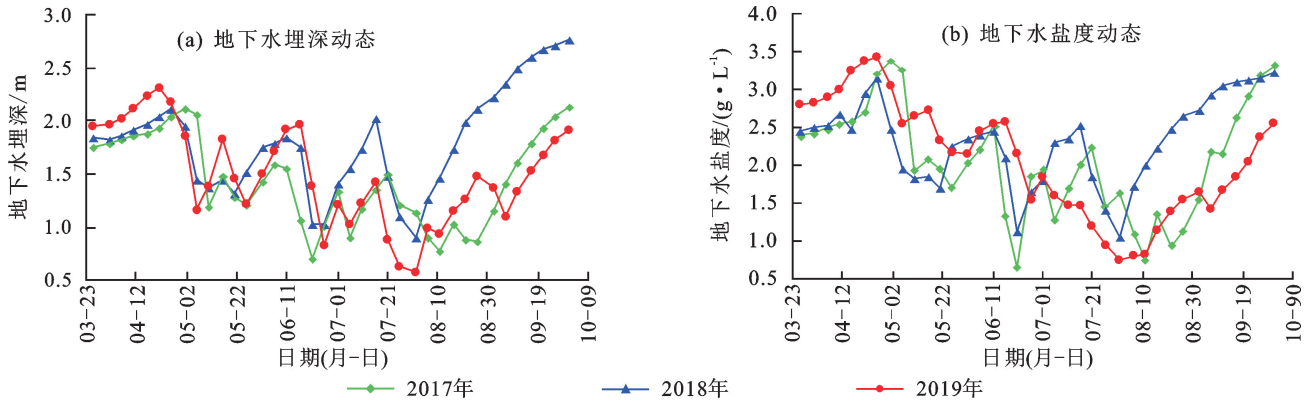

图 1　试验区地下水埋深和地下水盐度动态

Fig. 1　Dynamics of groundwater depth and salinity in the experimental area

表 3　渠引黄河水和地下水主要盐分离子含量

Table 3　The main salt ions content of Yellow River water and groundwater　　mg/L

主要盐分离子	浅层地下水	黄河水	主要盐分离子	浅层地下水	黄河水
Ca^{2+}	135.5	47.5	HCO_3^-	182.4	168.9
Mg^{2+}	86.0	18.4	CO_3^{2-}	0	0
K^+	30.5	13.5	Cl^-	773.1	116.9
Na^+	390.4	82.4	SO_4^{2-}	333.5	86.5

1.2　试验设计

田间试验设置 3 个灌溉水盐度水平(S1=1 g/L,S2=2 g/L,S3=3 g/L),每个灌溉水盐度水平设置 5 个灌溉水钠钙摩尔浓度比(R1=1∶1,R2=3∶1,R3=5∶1,R4=7∶1,R5=9∶1),共计 15 个试验处理,每个试验处理设置 3 个重复,每个重复处理对应 1 个试验小区(长 10 m×宽 6 m)。用于试验的灌溉水源由渠引黄河水和化学药品(NaCl 和 $CaCl_2$)复配而成,化学药品的具体添加剂量见表 4。参照当地传统秋浇模式,试验田于每年 11 月中旬引黄河水地面灌溉 1 次,灌溉定额为 300 mm。试验田于 2017—2019 年 4 月底先后在同一田块进行翻地、平整、起垄覆膜、铺设滴灌带,每个试验小区包括 4 个土垄,相邻 3 个试验小区共用 1 套独立的灌溉系统(1 个黑色水箱、3 支水表、3 个控制球阀),每个试验小区的输水支管对应安装 1 支计量水表和 1 个控制球阀。试验用番茄品种为试验区周边农户普遍使用的“秀光 306 号”,分别于 2017 年 5 月 10 日、2018 年 5 月 10 日和 2019 年 5 月 12 日移栽,株距 30 cm、行距 40 cm,番茄种植示意见图 2。

表 4　不同灌溉水源对应化学药品添加剂量

Table 4　The amount of chemical additive dosage correspond to different irrigation water sources　　mg/L

灌溉水源处理	$CaCl_2$	NaCl	灌溉水源处理	$CaCl_2$	NaCl	灌溉水源处理	$CaCl_2$	NaCl
S1R1	407.19	58.82	S2R1	1 062.05	403.95	S3R1	1 716.92	749.08
S1R2	187.07	278.93	S2R2	574.51	891.50	S3R2	961.94	1 504.06
S1R3	94.61	371.39	S2R3	369.70	1 096.30	S3R3	644.79	1 821.21
S1R4	43.71	422.29	S2R4	256.97	1 209.03	S3R4	470.22	1 995.78
S1R5	11.50	454.50	S2R5	185.62	1 280.39	S3R5	359.73	2 106.27

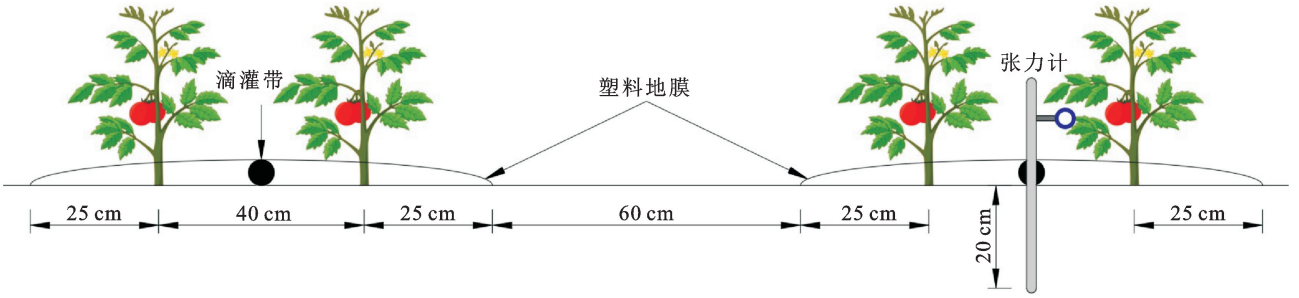

图 2 野外田间试验番茄种植示意

Fig. 2 Tomato planting schematic diagram for the field experiment

番茄幼苗移栽后，立即灌溉 30 mm 黄河水以提高幼苗成活率。试验通过在滴灌带下 20 cm 处埋设带陶土头的张力计指导灌溉，参考 KANG 等[21]的研究成果，试验设计灌溉控制下限为－20 kPa，当张力计读数达到－20 kPa 时立即灌溉 1 次，灌溉定额为 20 mm。每次灌溉期间通过试验小区对应安装在输水支管上的控制球阀和计量水表控制灌溉定额。番茄苗期至果实膨大期灌溉次数及灌溉定额见表 5，番茄进入成熟期停止灌溉。参考当地番茄种植传统施肥模式，基肥采用磷酸二铵（DAP：18% N，46% P，0% K）和硫酸钾（45% K_2SO_4），施肥量分别为 450，90 kg/hm²；番茄坐果期随灌溉水追施尿素（46% N），施肥量为 180 kg/hm²。其他农艺措施（除草等）与当地传统番茄种植保持一致。

表 5 不同试验处理灌溉次数及灌溉定额

Table 5 The irrigation times and irrigation quota for treatments

试验处理	2017 年					2018 年					2019 年				
	灌溉次数				灌溉定额/mm	灌溉次数				灌溉定额/mm	灌溉次数				灌溉定额/mm
	苗期	花期	坐果期	果实膨大期		苗期	花期	坐果期	果实膨大期		苗期	花期	坐果期	果实膨大期	
S1R1	2	4	7	7	400	2	4	7	8	420	2	4	7	7	440
S1R2	2	5	8	7	440	2	5	7	8	440	2	4	6	8	400
S1R3	2	5	7	7	420	2	5	7	8	440	2	5	6	7	400
S1R4	2	6	7	6	420	2	5	7	7	420	2	5	6	7	400
S1R5	2	4	6	7	380	2	4	7	8	420	2	4	6	7	380
S2R1	2	5	6	7	400	2	5	7	7	420	2	5	6	7	400
S2R2	2	6	6	6	400	2	6	6	7	420	2	4	7	7	400
S2R3	2	4	6	7	380	2	4	7	8	420	2	4	6	6	360
S2R4	2	4	5	6	340	2	4	6	6	360	2	4	5	6	340
S2R5	2	3	4	6	300	2	3	4	6	300	2	3	4	6	300
S3R1	2	4	6	6	360	2	4	6	6	360	2	4	5	6	340
S3R2	2	4	7	5	360	2	4	6	6	360	2	3	6	6	340
S3R3	2	3	5	5	300	2	3	5	5	300	2	3	5	5	300
S3R4	2	2	4	4	240	2	2	4	5	260	2	2	4	5	260
S3R5	2	1	3	3	180	2	1	3	4	200	2	1	3	3	180

1.3 样品采集与测定

野外试验期间，于番茄移栽前、每次灌溉前后、番茄收获后在各试验小区采集土样，取样位置为膜内（距滴灌带水平距离 22.5 cm）和膜外（距滴灌带水平距离 75 cm），采样垂直深度为 0—20，20—40，40—60，60—80，80—100 cm。采集土样一部分用于分析土壤含水率、土壤粒径、土壤容重，另一部分用于检测土壤溶液电导率、钠离子、镁离子、钙离子、速效氮、速效磷和速效钾含量。其中，土壤容重采用环刀法测定，土壤粒径结合土壤粒径分析仪（Bbckm－conl－trels－230）测定，土壤含水率结合称重法测定；土壤电导率采用电导率仪（DDSJ－308A）测定；土壤钠离子结合火焰分光光度计（Model 410 Flame photometer）测定；土壤钙离子、镁离子分别采用 EDTA 滴定法测定；土壤速效氮、速效磷和速效钾分别采用碱解法、NH_4F 萃取法和 NH_4OAC 萃取法测定。

番茄耗水量采用水量平衡法计算，公式为：

$$CWC = I + P + U - R - D + \Delta W \quad (1)$$

式中：I 为灌溉定额（mm）；P 为有效降水量，根据试验区气象站观测资料结合史海滨等[22]分析有效降水的方法，2017 年、2018 年、2019 年分别为 72.8，67.3，85.7

mm；U 为番茄根区的毛细管上升流量，结合土壤水分特征曲线采用负压计测量；R 为地下径流量，在本试验中为 0；D 为垂直向下的排水量，因本试验膜下滴灌单次灌水量小，根区土壤没有排水，取值为 0；ΔW 为番茄移栽前和收获后 2 次土壤水分测量对应的根区土壤水分变化量，结合土钻取土通过烘干称重法测量。

在番茄生育期结束时，各试验小区随机选择 3 株番茄植株，分解为根、茎、叶和果实，分别在 105 ℃下烘干 0.5 h，并在 75 ℃下烘干至每个器官的干物质达到恒定重量，检测各器官干物质量。然后，将烘干样品研磨后通过 0.5 mm 孔筛，并用 H_2SO_4—H_2O_2 处理。分别采用凯氏定氮法和钼蓝法检测氮素含量和磷素含量，结合火焰光度计检测钾素含量[23]。番茄植株的氮素积累总量可结合公式估算：

$$U_N = \sum_{i=1}^{4} U_{Ni} \tag{2}$$

$$U_{Ni} = c_{Ni} \times T_{mi} \tag{3}$$

式中：U_N 为番茄植株氮素积累总量（kg/hm²）；U_{Ni} 为番茄植株第 i 个器官的氮素积累量（kg/hm²）；c_{Ni} 为番茄植株第 i 个器官的氮素含量（%）；T_{mi} 为番茄植株第 i 个器官的干物质含量（kg/株）；i=1，2，3，4 分别代表番茄植株的根、茎、叶和果实。番茄植株中磷素和钾素积累总量的计算方法同氮素积累量计算方法。

田间试验的红熟番茄于 2017 年 8 月 25 日至 9 月 28 日、2018 年 8 月 26 日至 9 日 29 日和 2019 年 8 月 24 日至 9 月 27 日手工采摘。收获后，每个试验处理随机选择 11 个番茄，分别使用重力法和阿基米德排水法分析番茄的平均单果重和平均单果体积。此外，将番茄果实分为商品果和次品果（具有机械损伤或生理缺陷），记录商品果产量和次品果产量，总产量为商品果产量与次品果产量之和。番茄的水分生产率（WUE，kg/m³）计算公式为：

$$\mathrm{WUE} = \frac{TY \times 10}{\mathrm{CWC}} \tag{4}$$

式中：TY 为番茄果实总产量（kg/hm²）；CWC 为番茄植株生育期内耗水量（mm）。

参考张源沛等[24]在银川平原的研究成果，土壤含盐量可由土壤电导率通过经验公式转化计算。

$$SC_{i,j} = 2.912 \times EC_{i,j} + 0.154 \tag{5}$$

式中：$SC_{i,j}$ 为位置 i 和土层 j 处的土壤可溶性盐含量（g/kg）；$EC_{i,j}$ 为位置 i 和土层 j 处的土壤溶液电导率（mS/cm）；i =1 或 2，i =1 表示土壤采样点位置距滴灌带的水平距离为 22.5 cm，位于膜内，而 i = 2 表示土壤采样点位置距滴灌带的水平距离为 75 cm，位于膜外；j =1，2，3，4 或 5，分别代表土壤采样深度为 20，40，60，80，100 cm。

根据土垄的宽度及相邻土垄之间的水平距离，农田土壤盐分积累量可采用公式估算：

$$\mathrm{SSA}_{i,j} = \left[d_i \times h_j \times \left(\frac{10\ 000}{\sum d} \right) \right] \times (\gamma_j \times 1\ 000) \times [(\mathrm{SC}_{i,j} - \mathrm{SC}_{i,j}^0)/1\ 000] \tag{6}$$

式中：当 i =1 时，$\mathrm{SSA}_{i,j}$ 为膜内第 j 层土壤的盐分积累量（10³ kg/hm²）；当 i =2 时，$\mathrm{SSA}_{i,j}$ 为膜外第 j 层土壤的盐分积累量（10³ kg/hm²）；h_j 为第 j 土层的垂直厚度（m）；d_1 为土垄的宽度，0.9 m，d_2 为相邻土垄之间的水平距离，0.6 m；$\sum d$ 为 d_1 和 d_2 的总和，1.5 m；γ_j 为第 j 土层的容重（g/cm³）；$SC_{i,j}^0$ 为番茄移栽前位置 i 第 j 土层处的土壤可溶性盐含量本底值（g/kg）。

1.4　数据处理

利用 Origin 2021 软件分析试验区地下水埋深和地下水矿化度动态及植物特征和土壤盐碱特征与灌溉水钠钙摩尔比的回归关系；采用 SPSS 24.0 软件针对番茄耗水量、干物质量、果实产量和盐分积累量在 α=0.05 水平下进行单因素方差检验，并以灌溉水盐度和钠钙摩尔比为变量进行双因素方差分析。

2　结果与分析

2.1　灌溉水盐分组成对番茄耗水量的影响

灌溉水盐度、钠钙摩尔比及其交互对番茄耗水量均有极显著影响（p<0.01）（图 3）。S1R1 处理的番茄耗水量最大，在 2017 年、2018 年和 2019 年分别为 520.72，540.2，502.23 mm，而 S3R5 处理的番茄耗水量最小，且 S3R5 处理的番茄耗水量相对 S1R1 处理减少 44.9%～47.86%。一方面，番茄耗水量随着灌溉水盐度的增加而减少；另一方面，番茄耗水量随着灌溉水钠钙摩尔比的升高而降低，尤其当灌溉水钠钙摩尔比超过 5 时，番茄耗水量显著下降。此外，S2R1 和 S2R2 处理的番茄耗水量高于 S1R5 处理；同样，S3R1 和 S3R2 处理的番茄耗水量也高于 S2R5 处理。另外，2018 年相同试验处理的番茄耗水量高于 2017 年对应的番茄耗水量。

2.2　灌溉水盐分组成对番茄植株干物质及氮磷钾素积累的影响

植株干物质积累是农作物产量形成的重要物质基础。2017 年、2018 年和 2019 年番茄成熟期的植株器官（根、茎、叶）干物质量见图 4。各试验处理的番茄植株干物质量介于 90.08～119.13 g/株，S3R5 处

理对应植株干物质量最小。植株干物质主要积累在茎,茎的干物质量占整个植株干物质量的 48.39%～52.57%。尽管在相同灌溉水盐度下不同钠钙摩尔比处理的植株干物质积累量无显著差异,但当灌溉水盐度为 1 g/L 或 2 g/L 时,植株干物质量随着钠钙摩尔比的升高而先增加后减少;当灌溉水盐度为 3 g/L 时,植株干物质量随着钠钙摩尔比的升高持续下降。

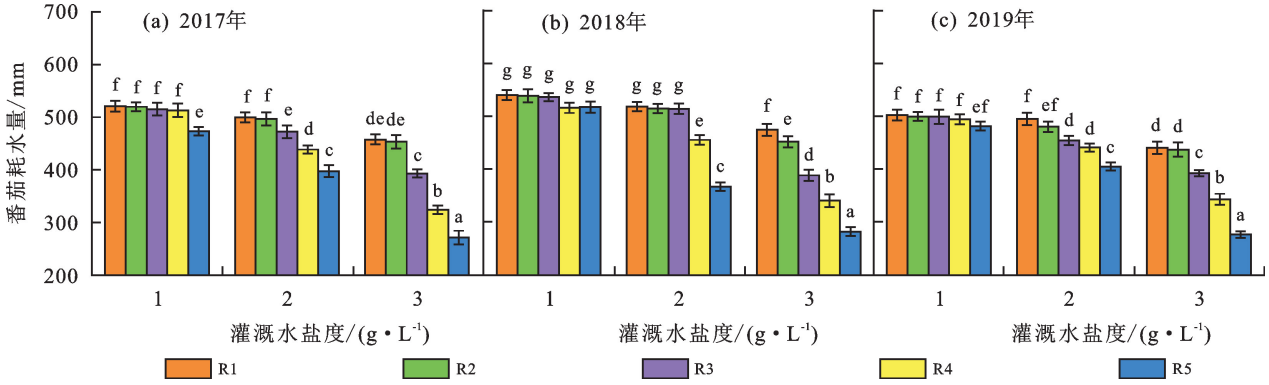

图 3 各试验处理番茄耗水量

Fig. 3 Water consumption of tomato for treatments

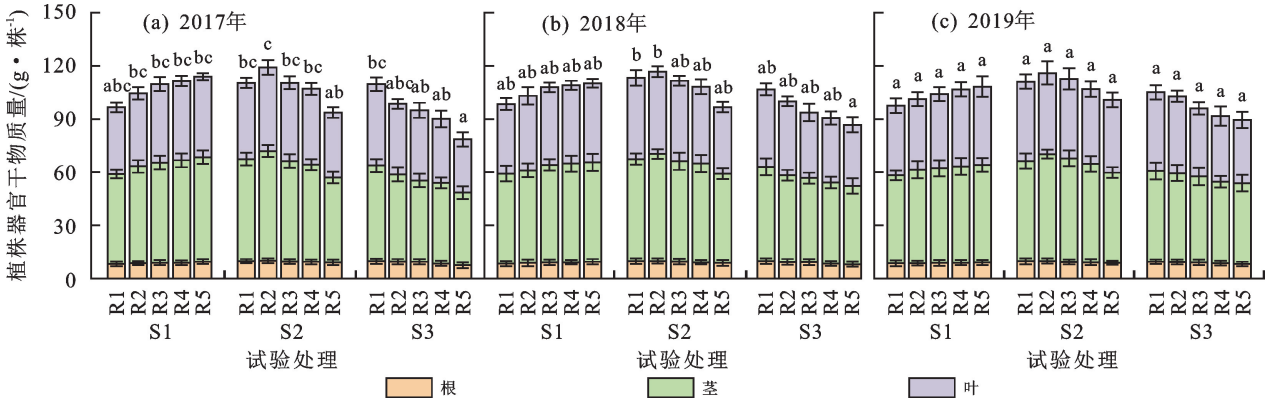

图 4 番茄植株干物质积累量

Fig. 4 Dry matter accumulation of tomato plant

氮、磷、钾是番茄生长发育的重要营养元素,主要依靠植株的根系从土壤中吸收。番茄生育期内植株器官(根、茎、叶)中氮、磷、钾素的积累量见图 5。从图 5 可以看出,植株氮、磷、钾素的积累量分别为 1.85～3.24,0.49～0.83,3.58～5.58 g/株。S1R3 和 S1R4 处理对应的植株氮素积累量高于其他试验处理,S1R4 处理的植株磷素积累量最大,S1R1 处理的植物钾素积累量最高,而 S3R5 处理对应植株的氮、磷、钾素积累量最低。

在相同灌溉水盐度下,当钠钙摩尔比超过 3 时,各试验处理植株的磷素和钾素积累量无显著差异。当灌溉水盐度为 1 g/L 或 2 g/L 时,随着钠钙摩尔比的升高,番茄植株根、茎、叶中氮素和磷素的积累量均先增加后减少,S1R4 和 S2R2 处理分别达到最大值。当灌溉水盐度达到 3 g/L 时,植株器官中氮、磷、钾素的积累量均随着钠钙摩尔比的升高而减少。当灌溉水钠钙摩尔比超过 5 时,植株氮素和磷素的积累量随着灌溉水含盐量的增加而减少。S2R4 和 S2R5 处理的植株氮素积累量明显低于 S2R1 和 S2R2 处理,同样,S3R4 和 S3R5 处理的植株氮素积累量显著低于 S3R1 处理。另外,S2R1 和 S3R1 处理的植株氮素和磷素积累量分别高于 S1R5 和 S2R5 处理。

以灌溉水盐度和钠钙摩尔比为自变量,对植株干物质和氮磷钾素的积累量进行双因素方差分析,结果见表 6。灌溉水盐度对番茄植株的干物质量和氮、磷、钾素积累量具有极显著影响。灌溉水钠钙摩尔比对植株氮素和钾素的积累量具有极显著影响,对植株的干物质积累量具有显著影响($p<0.05$)。此外,灌溉水盐度和钠钙摩尔比交互对植株干物质、磷素和钾素的积累无显著影响($p\geqslant0.05$)。

2.3 灌溉水盐分组成对番茄产量性状的影响

每个试验处理对应 3 个重复的番茄果实单果重、单果体积和单株果实数见表 7。S3R5 处理对应的番茄果实单果重、单果体积、单株果实数最小;S1R3 处理对应的番茄果实单果体积最大,S1R4 处理对应的植株果实数最大。

当灌溉水盐度为 1,2 g/L 时,试验处理对应番茄单果体积间无显著差异,介于 147.33～153.38 cm^3。

当灌溉水盐度为 1 g/L 时，各试验处理对应单株果实数间无显著差异，介于 18.5～19.5。在相同灌溉水盐度下，钠钙摩尔比为 1 和 3 对应番茄单果重无显著差异。在相同灌溉水钠钙摩尔比条件下，各试验处理对应的单果重随灌溉水盐度的增加而减少。另外，当灌溉水盐度为 2，3 g/L 时，各试验处理对应的单果重随钠钙摩尔比的增加而降低，尤其当灌溉水钠钙摩尔比超过 3 时，各试验处理对应的番茄单果重显著降低。此外，S2R1 和 S3R1 处理的单果重分别高于 S1R5 和 S2R5 处理对应值。当灌溉水盐度为 3 g/L 时，番茄果实的单果体积随着钠钙摩尔比的升高而降低，当灌溉水钠钙摩尔比超过 5 时，番茄单果体积显著降低。

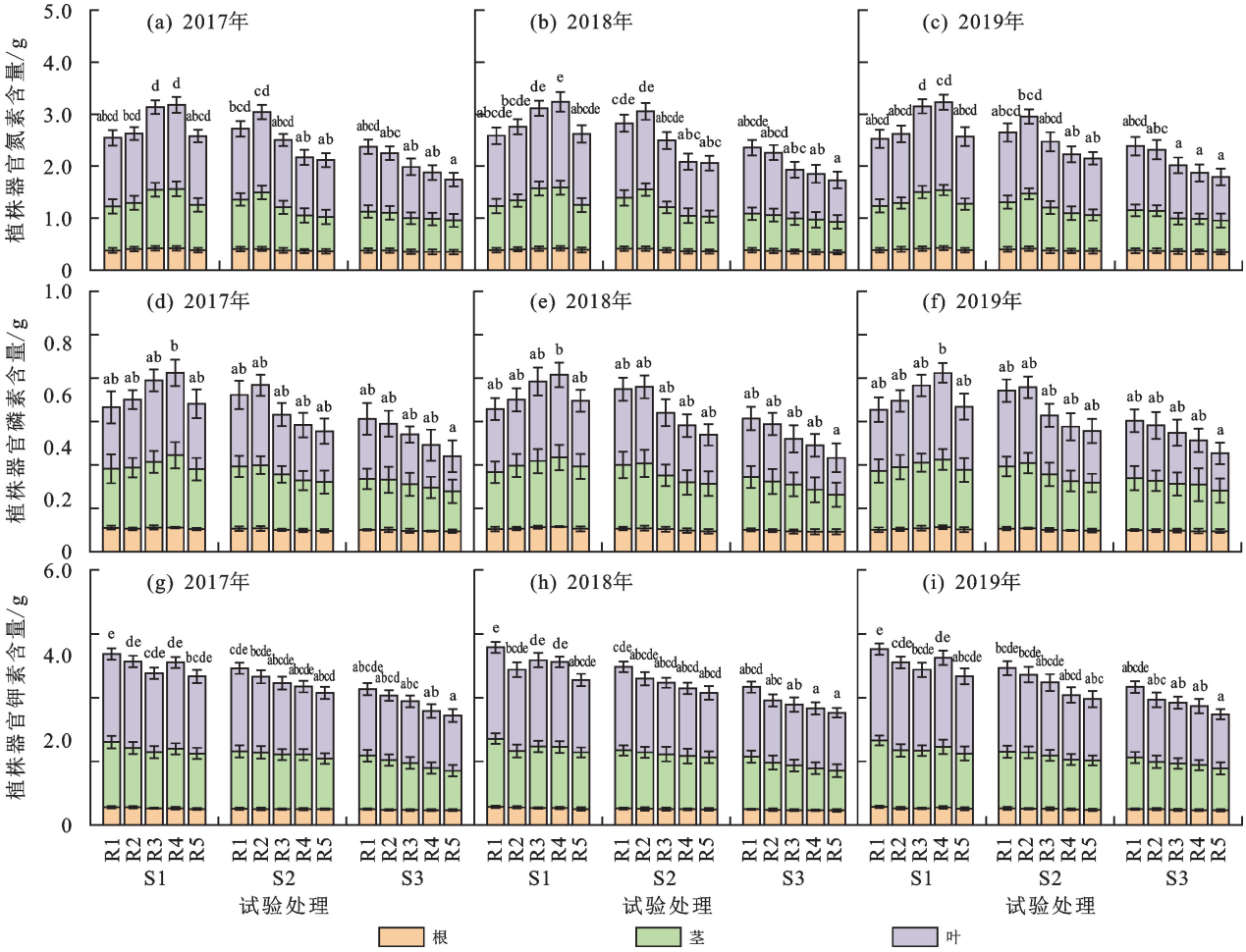

图 5　番茄植株氮磷钾素积累量

Fig. 5　Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in tomato plants

表 6　试验处理对植株干物质和养分积累影响的显著性水平

Table 6　The significant levels for the effect of experimental treatment on plants dry matter and nutrient accumulation

项目	2017 年				2018 年				2019 年			
	DM	NA	PA	KA	DM	NA	PA	KA	DM	NA	PA	KA
灌溉水盐度	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
灌溉水钠钙摩尔比	**	**	ns	**	*	**	*	**	*	**	*	**
盐度×钠钙摩尔比	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns

注：DM，NA，PA，KA 分别代表植株干物质、氮素、磷素和钾素积累量；ns 表示无显著性影响（$p \geqslant 0.05$）；* 表示显著影响（$p < 0.05$）；** 表示极显著影响（$p < 0.01$）。

各试验处理番茄商品果产量、总产量和水分生产率见表 7。S1R1 处理的番茄商品果产量和总产量最高，商品果产量介于 $11.19 \times 10^4 \sim 11.23 \times 10^4$ kg/hm^2，总产量介于 $11.23 \times 10^4 \sim 11.29 \times 10^4$ kg/hm^2。S3R4 和 S3R5 处理的番茄商品果产量和总产量显著低于其他试验处理。

此外，S1R4 处理的水分生产率最高（21.07～22.84 kg/m^3），而 S3R4 处理的水分生产率最低（13.02～13.54 kg/m^3）。当灌溉水钠钙摩尔比低于 5 时，各试验处理的商品果产量、总产量和水分生产率无显著差异。在相同灌溉水盐度下，番茄商品果产量和总产量随灌溉水钠钙摩尔比的升高而降低，尤其当

钠钙摩尔比超过 5 时，番茄商品果产量和总产量显著下降。

表 7 各试验处理的番茄产量性状

Table 7 Tomato yield traits for experimental treatments

处理	2017 年					2018 年					2019 年				
	AW	AV	AN	MY	TY	AW	AV	AN	MY	TY	AW	AV	AN	MY	TY
S1R1	268.05h	152.32cd	18.8e	11.21e	11.26e	269.30i	152.31c	18.8fg	11.19e	11.23e	270.35h	153.26d	18.8g	11.23g	11.29e
S1R2	268.65h	152.05cd	18.7e	11.15e	11.18e	265.85i	151.24c	18.5fg	11.11e	11.15e	268.75h	152.17d	18.7g	11.15g	11.17e
S1R3	265.60h	153.35d	18.9e	11.13e	11.15e	266.30i	153.46c	18.8fg	11.11e	11.14e	271.55h	153.34d	18.5g	11.11g	11.16e
S1R4	254.35g	153.03d	19.5e	10.94e	11.08e	255.65h	152.55c	19.2g	10.61e	10.87e	264.70h	152.09d	19.0g	11.08g	11.13e
S1R5	218.45d	152.25cd	19.5e	9.25d	9.47d	213.05e	153.43c	18.1f	8.27d	8.53d	220.45e	151.84d	19.2g	9.22e	9.38d
S2R1	267.75h	150.34cd	17.9d	10.62de	10.65de	270.55i	152.72c	17.0e	10.27e	10.32e	268.10h	150.73d	17.5f	10.49fg	10.53e
S2R2	265.85h	150.11cd	17.7d	10.52de	10.53de	266.45i	150.28c	17.4e	10.17e	10.28e	266.90h	151.26d	16.7e	9.83ef	10.03de
S2R3	241.55f	150.68cd	19.2e	10.15de	10.19de	246.35g	151.22c	18.4f	9.83e	10.04e	247.75g	151.33d	16.8e	9.19e	9.26d
S2R4	231.75e	145.24c	15.2c	7.63c	7.82c	222.90f	147.64c	15.6d	7.66cd	7.73cd	230.15f	149.12d	15.5d	7.88d	7.91c
S2R5	197.95c	145.79c	14.0b	5.99b	6.15b	187.30c	148.25c	14.5c	5.83b	6.04b	187.40c	148.67d	14.5c	5.95b	6.11b
S3R1	240.90f	138.62b	13.5b	7.22bc	7.26bc	242.65g	136.44b	13.5b	7.21cd	7.23c	241.70g	138.11c	13.5b	7.24cd	7.27bc
S3R2	236.85ef	136.43b	13.5b	6.86bc	7.12bc	240.30g	135.87b	13.5b	7.01bcd	7.21c	241.20g	137.34c	13.2b	7.01bcd	7.15bc
S3R3	203.05c	136.34b	15.3c	5.61b	6.88bc	200.55d	135.13b	14.9c	6.55bc	6.63bc	197.75d	131.49b	15.5d	6.67bc	6.73bc
S3R4	162.95b	94.57a	12.2a	3.08a	4.39a	168.95b	95.35a	11.9a	3.13a	4.45a	168.45b	91.62a	12.0a	3.27a	4.47a
S3R5	108.35a	91.87a	17.5d	3.03a	4.19a	141.60a	94.72a	13.2b	2.97a	4.13a	129.15a	91.13a	14.4c	3.06a	4.25a

注：AW 表示每个试验处理 3 个重复的单果重(g)；AV 表示单果平均体积(cm^3)；AN 表示单株果实数；MY 表示商品果产量(10^4 kg/hm^2)；TY 表示总产量(10^4 kg/hm^2)；

2.4 灌溉水盐分组成对土壤钠吸附比及土壤积盐量的影响

各试验处理 0—40，40—100 cm 的土壤钠吸附比见图 6。S3R4 和 S3R5 处理 0—40 cm 土壤钠吸附比超过 10 (mmolc/L)$^{1/2}$，而 S3R3 处理仅膜外 0—40 cm 的土壤钠吸附比高于 10 (mmolc/L)$^{1/2}$。40—100 cm 土壤钠吸附比介于 5.41～7.73 (mmolc/L)$^{1/2}$，S1R1 处理相对其他试验处理在膜外 40—100 cm 土壤钠吸附比更高，S3R5 处理相对其他试验处理在膜内 40—100 cm 土壤钠吸附比更高。各试验处理膜外 0—40 cm 土壤钠吸附比高于膜外 40—100 cm 土壤钠吸附比，并且上下 2 层土壤钠吸附比之间的差距随着灌溉水盐度和钠钙摩尔比的增加而增加。

当灌溉水盐度为 1 g/L 时，各试验处理 0—40 cm 土壤钠吸附比无显著差异，膜外 40—100 cm 土壤钠吸附比也没有显著差异；当灌溉水盐度为 3 g/L 时，膜内 0—40 cm 的土壤钠吸附比随着钠钙摩尔比的升高而显著增加，膜内 0—40 cm 土壤钠吸附比高于膜内 40—100 cm 和膜外 0—40 cm 土壤钠吸附比，这一结果与苏莹[25]的试验结果一致。当灌溉水盐度为 1 g/L 或 2 g/L 时，膜内 0—40 cm 土壤钠吸附比低于膜内 40—100 cm 和膜外 0—40 cm 土壤钠吸附比。各试验处理膜内 40—100 cm 的土壤钠吸附比随着灌溉水盐度和钠钙摩尔比的增加而增加，且膜内 40—100 cm 土壤钠吸附比高于膜外 40—100 cm 土壤钠吸附比。S2R1 和 S3R1 处理的膜内 40—100 cm 土壤钠吸附比分别低于 S1R5 和 S2R5 处理的对应值。

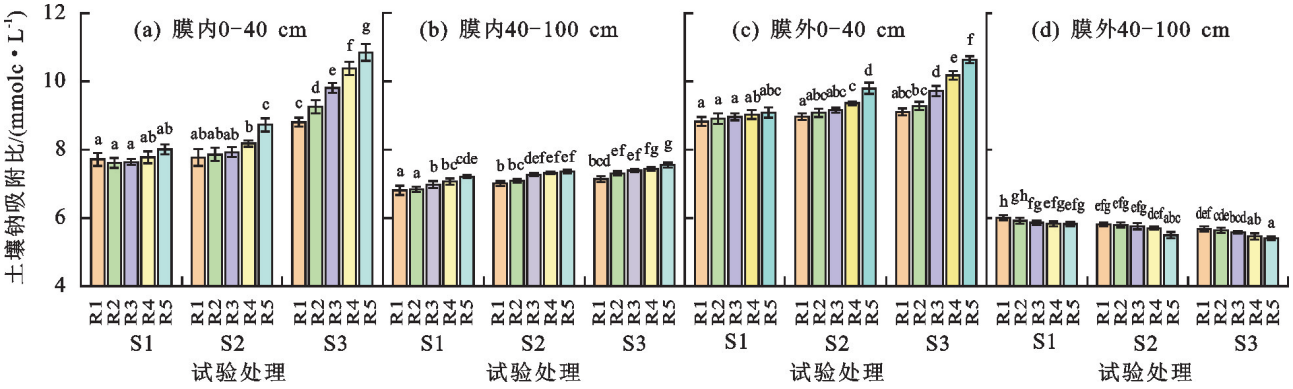

图 6 番茄收后土壤钠吸附比

Fig. 6 Soil sodium adsorption ratio after tomato harvest

番茄生育期内，各试验处理 0—40，40—100 cm 土壤积盐量见图 7。虽然各试验处理均在 0—100 cm 土

体积盐,但同一土层深度不同采样点位置的土壤盐分积累量存在显著差异:膜内 0—40 cm 土壤盐分积累量低于膜外 0—40 cm 土壤积盐量,而膜内 40—100 cm 土壤盐分积累量高于膜外 40—100 cm 土壤积盐量。在相同灌溉水盐度下,膜内 0—100 cm 土壤盐分积累量随着灌溉水盐度和钠钙摩尔比的增加而显著增加,膜外 0—100 cm 土壤积盐量随着灌溉水钠钙摩尔比的增加而增加。S1R1、S1R2、S1R3 和 S2R1 处理膜内 0—40 cm 土壤脱盐,脱盐量介于 47～813 kg/hm^2。各试验处理均在膜外 0—40 cm 积盐,积盐量介于 10.56×10^3～13.28×10^3 kg/hm^2;各试验处理均在 40—100 cm 范围内积盐,积盐量介于 6.84×10^3～17.55×10^3 kg/hm^2,而 S1R2 和 S2R1 处理膜外 40—100 cm 土壤脱盐,脱盐量介于 159.00～861.00 kg/hm^2。S2R1 和 S2R2 处理的积盐量低于 S1R5 处理,S3R1 和 S3R2 处理的积盐量低于 S2R5 处理。

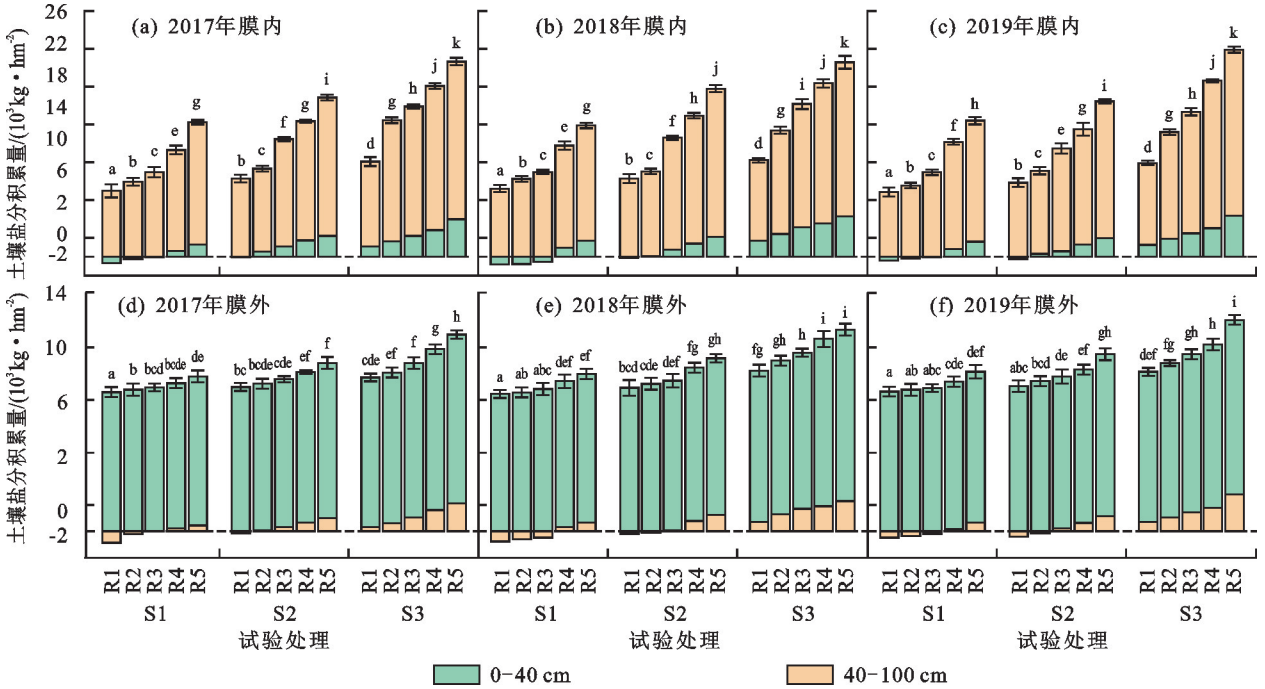

图 7　番茄生育期内土壤盐分积累

Fig. 7　Soil salt accumulation during tomato growth period

2.5　相关性及优选

植株干物质量、植株养分积累量、番茄产量、土壤钠吸附比、土壤盐分积累量均与灌溉水 Na∶Ca 摩尔比呈显著相关关系(图 8 和图 9)。根据线性拟合或二次多项式拟合结果,当灌溉水盐分浓度为 1 g/L 时,植株干物质积累量、氮素积累量和磷素积累量、商品果产量、总产量均与灌溉水 Na∶Ca 摩尔比呈显著二次相关关系(r^2>0.65),植株钾素积累量随着灌溉水 Na∶Ca 摩尔比的增加而线性减少。当灌溉水盐分浓度为 2 g/L 或 3 g/L 时,番茄商品果产量、总产量以及植株的干物质、氮磷钾素积累量均随着灌溉水 Na∶Ca 摩尔比的增加而线性下降;灌溉水 Na∶Ca 摩尔比每增加 1,番茄商品果产量下降 5 761.70～6 036.70 kg/hm^2,植株干物质积累量减少 130.88～141.80 kg/hm^2。

在相同灌溉水盐分浓度下,回归分析发现,膜内 0—100 cm 土壤钠吸附比、膜外 0—40 cm 土壤钠吸附比、膜内膜外 0—100 cm 土壤盐分积累量随灌溉水 Na∶Ca 摩尔比的增加呈线性增加的趋势。膜外 40—100 cm 土壤钠吸附比随灌溉水 Na∶Ca 摩尔比的增加线性降低。

3　讨 论

3.1　番茄植株耗水量

咸水灌溉条件下,一方面土壤中的盐分可能抑制土壤水分入渗,导致土壤水分可利用性下降[26-27],造成植株根区的土壤水势下降,植物根系吸水受到抑制,植株蒸腾作用减弱[28-29];另一方面,Na^+、Cl^-、SO_4^{2-} 等离子可能诱发离子毒性抑制植株蒸腾作用[30]。本研究发现,随着灌溉水盐度或钠钙摩尔比增加,番茄耗水量降低,这一结果与 HARUN 等[31]的研究结果一致,他们研究认为盐分胁迫对番茄的不利影响取决于盐分组成和胁迫水平等因素。当灌溉水盐度为 2 g/L 或 3 g/L 时,番茄耗水量随灌溉水钠钙摩尔比的升高而下降,这可能与番茄生长迟缓有关。W2R1 和 W2R2 处理的番茄耗水量高于 W1R5 处理,同样,S3R1 和 S3R2 处理的番茄耗水量也高于 S2R5 处理,这表明高盐度(2 g/L 或 3 g/L)低钠钙摩尔比(1 或 3)的灌溉水相对低盐度(1 g/L 或 2 g/L)高钠钙摩尔比(9)的灌溉水更有利于番茄根系吸水。

以番茄耗水量作为表征植物生长的指标，宁夏银北灌区番茄的适宜灌溉水钠钙摩尔比应小于 5。

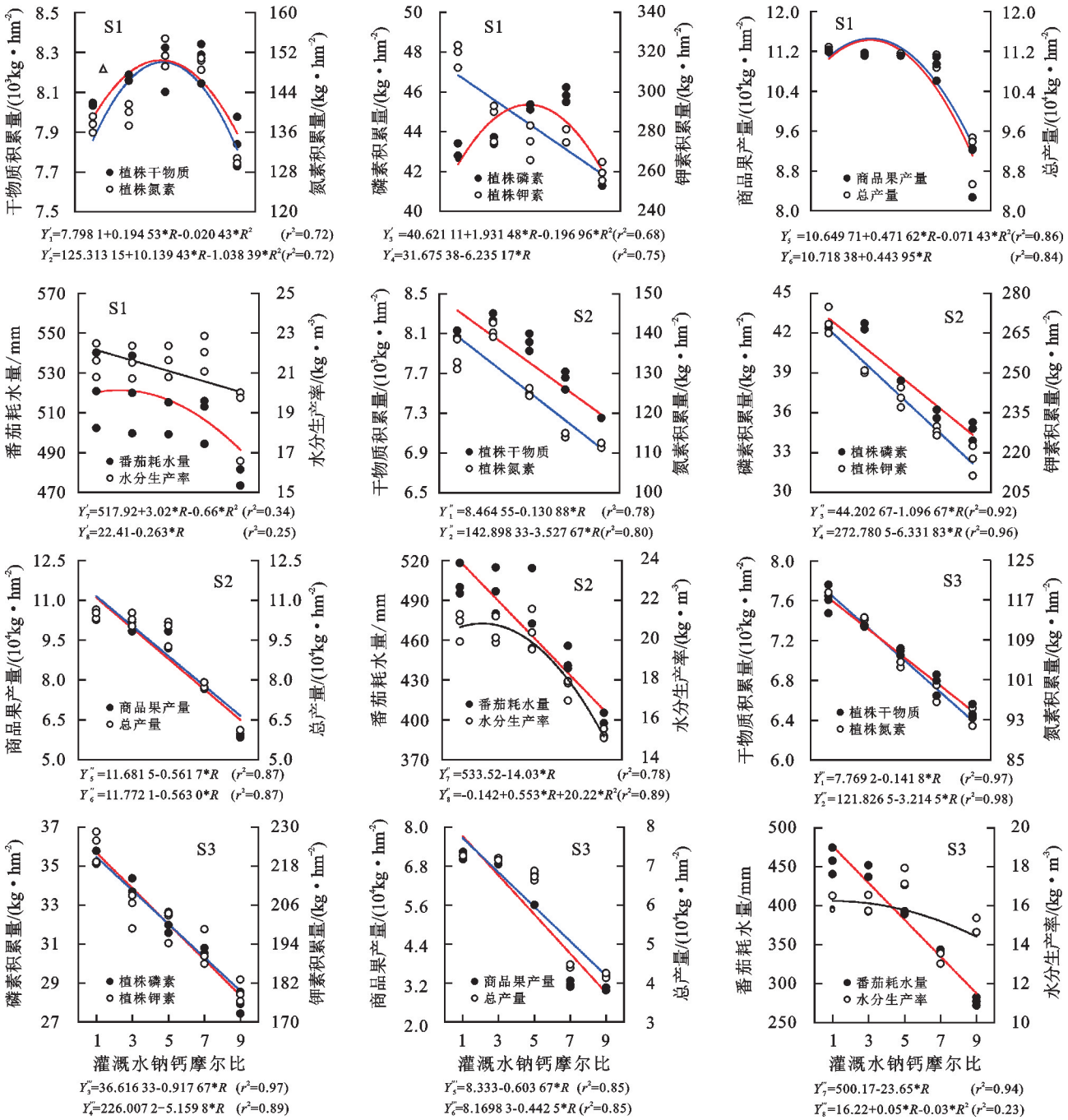

图 8 植株特征与灌溉水钠钙摩尔比回归关系

Fig. 8 Regression relationship between plant characteristics and irrigation water sodium-calcium molar ratios

3.2 番茄植株干物质及营养元素积累

咸水灌溉通常对作物产生双重影响，一方面，轻度盐分胁迫有助于增强植株的渗透调节能力，提高一些关键酶（如三磷酸腺苷）的活性，促进植株生长；另一方面，咸水灌溉引起的渗透胁迫和离子毒性，通常对植株的生理、生化功能产生不良影响，减缓植株细胞生长速率，降低光合强度，减少有机物合成，妨碍植株干物质正常积累。本试验中番茄植株干物质积累量的变化与 GUO 等[32]的研究结果一致，番茄植株生物量随着灌溉水盐度的增加呈下降趋势，这可能是由于植株器官（根、茎、叶等）的发育受到盐分胁迫的抑制作用[33]。此外，灌溉水钠钙摩尔比对植株氮素和钾素的积累具有极显著影响，这与 MACHEKPOSHTI 等[34]的研究结果一致。当灌溉水盐度为 1 g/L 时，植株的干物质积累量、氮素积累量和磷素积累量与灌溉水钠钙摩尔比呈显著的二次函数关系（$r^2>0.65$），且当灌溉水钠钙摩尔比为 5 时对应积累量达到最大值；当灌溉水含盐量为 3 g/L 时，随着灌溉水钠钙摩尔比的升高，植株干物质积累量、氮素积累量、磷素积累量和钾素积累量均线性下降（图 8）。

这可能是由于植株受 Na^+ 毒性的影响,在相同灌溉水盐分水平下对某些盐分离子(K^+、Ca^{2+} 等)和营养成分(氮、磷等)的吸收能力随着土壤溶液中 Na^+ 浓度的增加而降低[35]。此外,S2R1 和 S3R1 处理的植株氮素和磷素积累量分别高于 S1R5 和 S2R5 处理对应值,这表明与盐度较低、钠钙摩尔比较高的灌溉水相比,盐度较高、钠钙摩尔比较低的灌溉水更有利于番茄植株氮素和磷素的积累。根据番茄生育期内植株干物质、氮素、磷素和钾素积累量,本文推荐番茄种植的灌溉水盐度为 1 g/L,钠钙摩尔比为 5。

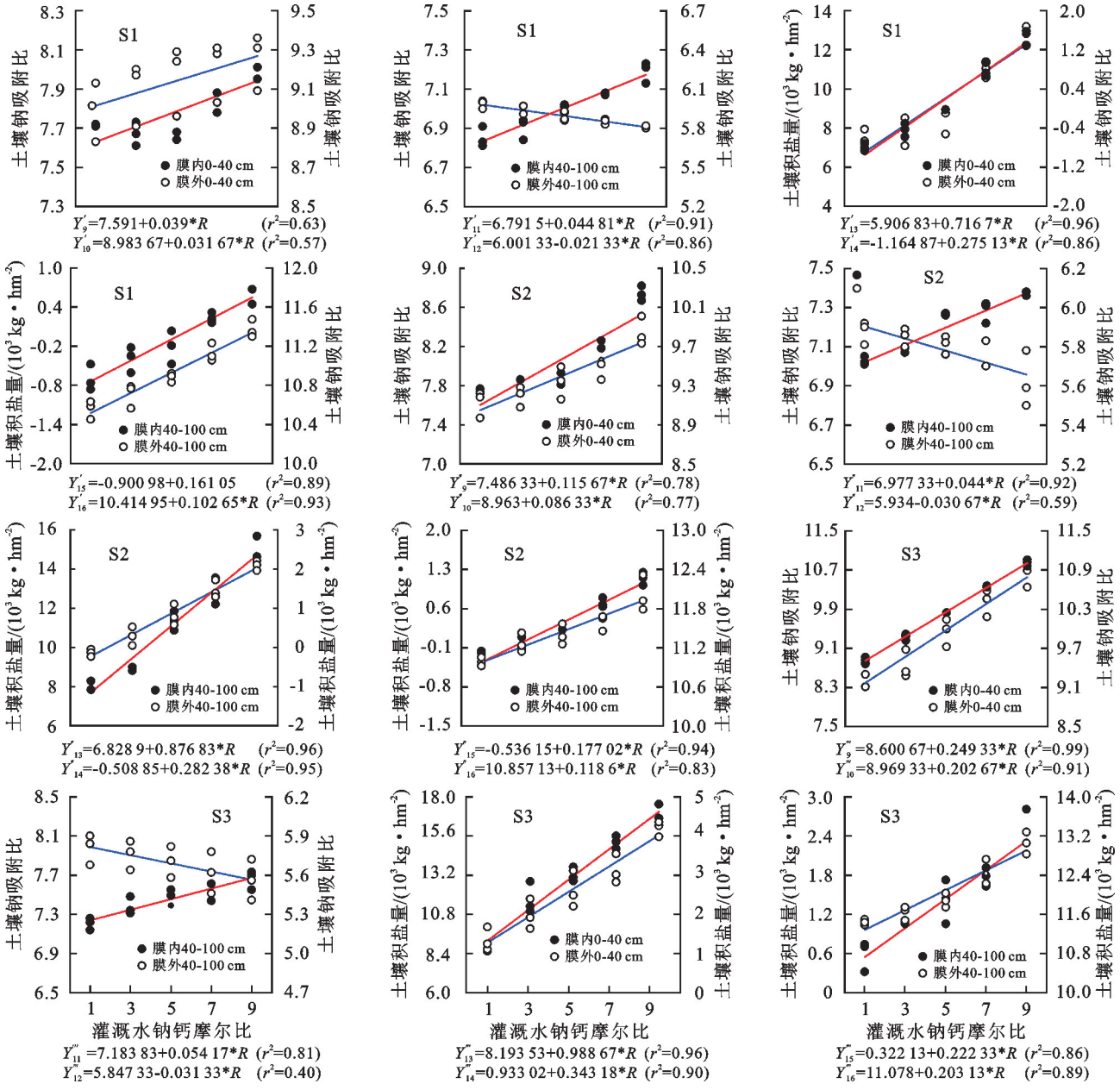

图 9　土壤盐碱特征与灌溉水钠钙摩尔比线性关系

Fig. 9　The linear relationship between soil saline－alkali characteristics and the irrigation water sodium－calcium molar ratios

3.3　番茄产量和产量性状

研究[29,36]表明,不合理的灌溉水质可能导致番茄单果重下降,产量降低。本试验发现,随着灌溉水盐度的增加,番茄单果重、商品果产量和总产量均有所下降。根据 LI 等[37]的研究结果,番茄植株器官中过高的 Na^+ 含量可能引起叶绿素分解,导致光合作用强度下降,有机物积累减少、单果重降低。试验发现,在灌溉水盐度 2 g/L 或 3 g/L 下,番茄的商品果产量、总产量均随着灌溉水钠钙摩尔比的升高而线性下降(图 8)。当灌溉水盐度达到 3 g/L 时,番茄果实体积随灌溉水钠钙摩尔比的增加而下降,这与 ZHANG 等[27]的研究结果一致,即番茄的果实大小随灌溉水含盐量和 Na^+ 浓度的升高而降低。此外,S2R1 处理和 S3R1 处理的单果重分别高于 S1R5 处理和 S2R5 处理对应值,这表明,与低盐度、高钠钙摩尔比的灌溉水相比,高盐度、低钠钙摩尔比的灌溉水更有利于番茄果实发育。与

S1R1处理相比，S2R3处理的商品果产量下降13.26%，而水分生产率下降5.24%。

在相同灌溉水盐度水平下，番茄商品果产量与总产量之比随着灌溉水钠钙摩尔比的升高而降低。尤其灌溉水盐度高(3 g/L)和钠钙摩尔比高(7和9)的试验处理，商品果产量与总产量的比例下降近30.00%。这一研究结果与ADAMS等[38]的研究结果一致，随着灌溉水盐度和Na^+浓度的升高，从土壤到植株根部的Ca^{2+}吸收和从植株根部到果实的Ca^{2+}运输可能受到抑制，因此，番茄的裂果、坏果比率升高[39]。综合来看，为了获得可观的番茄商品果产量，本试验推荐使用盐度低于2 g/L、钠钙摩尔比小于5的灌溉水。

3.4 土壤钠吸附比及土壤积盐量

土壤钠吸附比过高通常对应较高的土壤交换性钠浓度、较弱的土壤pH缓冲能力[40]、较低的土壤微生物活性，在较高的土壤钠吸附比下，植株生长通常受到抑制。试验发现，当灌溉水盐度较高(3 g/L)时，灌溉水钠钙摩尔比对膜内0—40 cm土壤钠吸附比有显著影响，且土壤钠吸附比随灌溉水钠钙摩尔比的升高线性增加(图9)，这与郭全恩等[13]的研究结果一致。郭全恩等[13]研究发现，灌溉水的盐分组成对土壤钠吸附比具有显著影响；苏莹[25]的研究结果表明，表层土壤的钠吸附比高于深层土壤的钠吸附比，且表层土壤钠吸附比随着灌溉水钠吸附比的增加而增加。这可能是由于土壤胶体对Na^+的吸附能力较弱，以及高盐度水灌溉向表层土壤携带大量Na^+。此外，S2R1和S3R1处理对应的膜内40—100 cm土壤钠吸附比分别低于S1R5和S2R5处理对应值，这表明与低盐度、高钠钙摩尔比的灌溉水相比，高盐度、低钠钙摩尔比的灌溉水更有利于减缓膜内土壤钠吸附比的升高。

在相同灌溉水盐度水平下，膜内和膜外0—100 cm土壤盐积累量均随灌溉水钠钙摩尔比的增加线性增加(图9)，该结果与郭全恩等[13]和LI等[15]的研究结果一致。这可能是由于钠离子具有离子电荷低、半径大、水合作用小、对土壤胶体吸附能力弱的特点，Na^+在交换位点位容易取代Ca^{2+}和Mg^{2+}[41]，促进土壤盐分积累。此外，膜内表层40 cm土壤钠吸附比低于膜外0—40 cm、膜内40—100 cm土壤钠吸附比；膜内表层40 cm土壤盐分积累量低于膜外0—40 cm、膜内40—100 cm土壤盐分积累量。这主要受灌溉淋滤、覆膜抑制表层土壤蒸发、土壤水分入渗和表层土壤蒸发的影响[13,26,42]。部分研究[43]表明，适当增加灌溉水盐度在一定程度上有助于改善表层土壤渗透性，史晓楠等[44]研究发现，当灌溉水含盐量达到3 g/L时，土壤入渗能力达到最大值。然而，不合理的灌溉水盐分组成可能对土壤性质产生不利影响[43]，如耕层土壤盐分大量积累，交换性钠离子聚集，部分土壤微生物活性降低等[13,45]。

为避免土壤钠吸附比过高，减少土壤盐分积累，本试验推荐试验区番茄种植采用盐度1 g/L、钠钙摩尔比为1的灌溉水。由于番茄生育期内试验设计灌溉模式下各试验处理0—100 cm土壤均积盐，有必要采取有效措施(淡水补充灌溉等)，确保番茄大田栽培可持续生产。

4 结论

(1)灌溉水盐度2，3 g/L水平下，灌溉水盐度每增加1，番茄耗水量分别减少14.18，23.27 mm。

(2)在灌溉水盐度1 g/L下，适当提高灌溉水钠钙摩尔比有利于植株的干物质和养分积累，灌溉水钠钙摩尔比促进植株干物质积累、氮素积累、磷素积累的临界值为5。在灌溉水盐度2 g/L或3 g/L下，灌溉水钠钙摩尔比每增加1，植株干物质积累量减少141.8 kg/hm²，商品果产量减少6 036.7 kg/hm²。

(3)番茄单果重、商品果产量、总产量随灌溉水钠钙摩尔比增加线性减少。在低灌溉水盐度(1 g/L)下，灌溉水钠钙摩尔比促进番茄商品果产量和总产量，增加的阈值为3。

(4)在灌溉水盐度1 g/L下，随着灌溉水钠钙摩尔比增加，0—40 cm土壤钠吸附比、0—100 cm土壤盐分积累量和0—40 cm土壤速效氮积累量均呈线性增加。在灌溉水盐度3 g/L下，0—40 cm土壤钠吸附比和0—100 cm土壤盐分积累量均随灌溉水钠钙摩尔比的增加而增加。与低盐度、高钠钙摩尔比的灌溉水相比，高盐度、低钠钙摩尔比的灌溉水更有利于降低膜内40—100 cm土壤钠吸附比和0—100 cm土壤盐分积累量。

综上，以番茄果实高产、土壤盐碱防治为目标，推荐银北引黄灌区番茄栽培的适宜灌溉水盐度为2 g/L，钠钙摩尔比为5。

参考文献：

[1] IERNA A, MAUROMICALE G. Potato growth, yield and water productivity response to different irrigation and fertilization regimes[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 21-26.

[2] UDDAMERI V, GHASEMINEJAD A, HERNANDEZ E A. A tiered stochastic framework for assessing crop yield loss risks due to water scarcity under different uncertainty levels[J]. Agricultural Water Management, 2020, 238: e106226.

[3] XUE J, REN L. Conjunctive use of saline and non-saline water in an irrigation district of the Yellow River Basin[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(2): 147-162.

[4] 陈佩,王金涛,董心亮,等.蔬菜咸水灌溉研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(5):799-808.
CHEN P, WANG J T, DONG X L, et al. Review of research development associated with the application of saline water irrigation to vegetables[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2022,30(5):799-808.

[5] SEKHON K S, KAUR A, THAMAN S, et al. Irrigation water quality and mulching effects on tuber yield and soil properties in potato (*Solanum tuberosum* L.) under semi-arid conditions of Indian Punjab[J]. Field Crops Research,2020,247:e107544.

[6] 雷廷武,肖娟,王建平,等.微咸水滴灌对盐碱地西瓜产量品质及土壤盐渍度的影响[J].水利学报,2003,34(4):85-89.
LEI T W, XIAO J, WANG J P, et al. Experimental investigation on the effects of saline water drip irrigation on water use efficiency and quality of watermelons grown in saline soils[J].Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(4):85-89.

[7] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.
WANG Q J, SHAN Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):117-126.

[8] EL-MOGY M M, GARCHERY C, STEVENS R. Irrigation with salt water affects growth, yield, fruit quality, storability and marker-gene expression in cherry tomato[J]. Acta Agriculturae Scandinavica,2018,68(8):727-737.

[9] BAATH G S, SHUKLA M K, BOSLAND P W, et al. Irrigation water salinity influences at various growth stages of capsicum annuum[J].Agricultural Water Management,2017,179:246-253.

[10] ALHARBY H F, COLMER T D, BARRETT-LENNARD E G. Salinization of the soil solution decreases the further accumulation of salt in the root zone of the halophyte *Atriplex nummularia* Lindl. growing above shallow saline groundwater[J].Plant, Cell and Environment,2018,41(1):99-110.

[11] KUMAR V, KHARE T. Differential growth and yield responses of salt-tolerant and susceptible rice cultivars to individual (Na^+ and Cl) and additive stress effects of NaCl [J].Acta Physiologiae Plantarum,2016,38(7):e170.

[12] LI W J, GAO Y M, TIAN Y Q, et al. Double-root-grafting enhances irrigation water efficiency and reduces the adverse effects of saline water on tomato yields under alternate partial root-zone irrigation[J].Agricultural Water Management,2022,264:e107488.

[13] 郭全恩,南丽丽,李保国,等.灌溉水盐分组成对土壤水盐迁移参数的影响[J].农业工程学报,2017,33(23):123-128.
GUO Q E, NAN L L, LI B G, et al. Effect of salt ion composition of irrigation water on parameters of soil water and salt movement[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(23):123-128.

[14] 邢旭光,马孝义,康端刚.盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J].农业工程学报,2016,32(9):115-122.
XING X G, MA X Y, KANG D G. Impacts of type and concentration of salt cations on soil water retention and desiccation cracking[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(9):115-122.

[15] LI J G, CHEN J, QU Z Y, et al. Effects of alternating irrigation with fresh and saline water on the soil salt, soil nutrients, and yield of tomatoes[J].Water,2019,11(8):e1693.

[16] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants [J].Cell,2016,167(2):313-324.

[17] FLORES P, HERNÁNDEZ V, HELLÍN P, et al. Metabolite profile of the tomato dwarf cultivar Micro-Tom and comparative response to saline and nutritional stresses with regard to a commercial cultivar[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2016,96(5):1562-1570.

[18] 张珂萌,牛文全,汪有科,等.微咸水微润灌溉下土壤水盐运移特性研究[J].农业机械学报,2017,48(1):175-182.
ZHANG K M, NIU W Q, WANG Y K, et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moistube-irrigation with brackish water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):175-182.

[19] VAN ZELM E, ZHANG Y X, TESTERINK C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. Annual Review of Plant Biology,2020,71:403-433.

[20] ZHAI Y M, YANG Q, HOU M M. The effects of saline water drip irrigation on tomato yield, quality, and blossom-end rot incidence: A 3 a case study in the south of China[J].PLoS One,2015,10(11):ee0142204.

[21] KANG Y H, WAN S Q. Effect of soil water potential on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use under drip irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 2005, 106(3):275-292.

[22] 史海滨,田军仓,刘庆华.灌溉排水工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
SHI H B, TIAN J C, LIU Q H. Irrigation and drainage engineering[M].Beijing: China Water and Power Press,2006.

[23] CHEN Q W, MU X H, CHEN F J, et al. Dynamic change of mineral nutrient content in different plant organs during the grain filling stage in maize grown under contrasting nitrogen supply[J].European Journal of Agronomy,2016,80:137-153.

[24] 张源沛,胡克林,李保国,等.银川平原土壤盐分及盐渍土

的空间分布格局[J].农业工程学报,2009,25(7):19-24.
ZHANG Y P, HU K L, LI B G, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan Plain of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(7):19-24.

[25] 苏莹.微咸水地面灌溉试验研究[D].西安:西安理工大学,2006.
SU Y. Experimental studies on saline water surface irrigation [D].Xi'an: Xi'an University of Technology,2006.

[26] LAKHDAR A, RABHI M, GHNAYA T, et al. Effectiveness of compost use in salt-affected soil[J].Journal of Hazardous Materials,2009,171(1/2/3):29-37.

[27] ZHANG P F, SENGE M, YOSHIYAMA K, et al. Effects of low salinity stress on growth, yield and water use efficiency of tomato under soil less cultivation[J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation. Drainage and Rural Engineering,2017,85(1):115-121.

[28] DONG Q G, YANG Y C, ZHANG T, et al. Impacts of ridge with plastic mulch-furrow irrigation on soil salinity, spring maize yield and water use efficiency in an arid saline area[J].Agricultural Water Management, 2018,201:268-277.

[29] BOARI F, DONADIO A, PACE B, et al. Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato[J].Agricultural Water Management, 2016,167:29-37.

[30] CHINNUSAMY V, JAGENDORF A, ZHU J K. Understanding and improving salt tolerance in plants[J]. Crop Science,2005,45(2):437-448.

[31] KAMAN H R, KURUNÇ A, DEMIR H, et al. Salinity change in different soil layers of tomato irrigated with salty water[J].International Journal of Plant and Soil Science,2017,19(5):1-6.

[32] GUO X P, TACKMORE M R, OBAI K, et al. The combined effects of salinity and water stress on the growth and yield quality of tomato [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295/296/297/298: 2265-2273.

[33] DING D Y, FENG H, ZHAO Y, et al. Effects of continuous plastic mulching on crop growth in a winter wheat-summer maize rotation system on the Loess Plateau of China[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2019,271:385-397.

[34] FARHADI MACHEKPOSHTI M, SHAHNAZARI A, Z AHMADI M, et al. Effect of irrigation with sea water on soil salinity and yield of oleic sunflower[J].Agricultural Water Management,2017,188:69-78.

[35] PARIHAR P, SINGH S, SINGH R, et al. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: A review[J].Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(6):4056-4075.

[36] YANG H, DU T S, MAO X M, et al. A comprehensive method of evaluating the impact of drought and salt stress on tomato growth and fruit quality based on EPIC growth model [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 116-127.

[37] LI J S, GAO Y M, ZHANG X Y, et al. Comprehensive comparison of different saline water irrigation strategies for tomato production: Soil properties, plant growth, fruit yield and fruit quality[J].Agricultural Water Management,2019,213:521-533.

[38] ADAMS S R, COCKSHULL K E, CAVE C R J. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits [J]. Annals of Botany, 2001, 88 (5): 869-877.

[39] WAN S Q, JIAO Y P, KANG Y H, et al. Drip irrigation of waxy corn (*Zea mays* L. var. ceratina Kulesh) for production in highly saline conditions [J]. Agricultural Water Management,2012,104:210-220.

[40] SAIFULLAH, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities [J]. The Science of the Total Environment,2018,625:320-335.

[41] YAN S H, GAO Y M, TIAN M J, et al. Comprehensive evaluation of effects of various carbon-rich amendments on tomato production under continuous saline water irrigation: Overall soil quality, plant nutrient uptake, crop yields and fruit quality [J]. Agricultural Water Management, 2021, 255:e106995.

[42] HUANG C H, PENG F, YOU Q G, et al. Growth, yield and fruit quality of cherry tomato irrigated with saline water at different developmental stages[J].Acta Agriculturae Scandinavica,2016,66(4):317-324.

[43] LI D, WAN S Q, LI X B, et al. Effect of water-salt regulation drip irrigation with saline water on tomato quality in an arid region[J].Agricultural Water Management,2022,261:e107347.

[44] 史晓楠,王全九,苏莹.微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响[J].干旱区地理,2005,28(4):516-520.
SHI X N, WANG Q J, SU Y. Effects of slight saltwater quality on the characteristics of soil water and salt transference[J].Arid Land Geography,2005,28(4):516-520.

[45] MUYEN Z, MOORE G A, WRIGLEY R J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia[J].Agricultural Water Management,2011,99(1): 33-41.