

# 灌溉水质对土壤水盐动态的影响\*

肖 振 华

B. Prendergast C. L. Noble

(中国科学院南京土壤研究所, 21008)

(澳大利亚 灌溉及盐渍化研究所)

## 摘 要

本文研究了灌溉水质对土壤水盐动态和牧草生长的影响。灌溉水含盐量分别为 100、1500 和 3000mg/L, 设有 6 个试验处理。在高含盐水灌溉期间, 盐分在土壤剖面中累积, 低含盐水灌溉和冬季降雨期间部分土壤盐分被淋洗。由于盐分累积与淋洗反复进行, 以及弱透水层的存在, 可溶盐在 60—90cm 土层明显增加, 土壤溶液钠吸附比 (SAR) 随灌溉水含盐量增加而增高, 牧草茎叶中的盐分亦随之而变化。当灌溉水含盐量达到 1500mg/L 时, 牧草产量不受影响, 灌溉水含盐量 3000mg/L 时在不同试验处理条件下仅仅减产 9% 至 17%, 显然, 灌溉管理及盐分控制措施起着一定的调节作用。

**关键词** 灌溉水质, 淋洗比, 盐分累积, 水盐动态, 钠吸附比

澳大利亚维多利亚州北部的 Shepparton 地区(约 500000 公顷), 长期过量灌溉和排水不良, 地下水(电导率  $EC_w = 2.5—6.0dS/m$ ) 已在大范围内上升至离地表 1—2m, 开始危害作物生长和加速土壤盐渍化过程。因此, 建立竖井排水系统控制地下水位被认为是一项重要的战略措施。为了尽可能少的盐分进入 Murray 河, 抽出的大部分地下水必需重新用于灌溉<sup>[1]</sup>, 同时, 由于地面水源不足, 开发利用地下水源就更显得重要, 因此, 不同灌溉水质对农牧作物生长和土壤盐渍化的影响成为重要的研究课题。Mehanni<sup>[6]</sup> 发现灌溉水含盐量 700mg/L 对牧草生长没有影响, 含盐量 1500 和 3000mg/L 可能引起牧草减产 25% 和 50%。Noble<sup>[7]</sup> 的研究认为灌溉水电导率 ( $EC_w$ ) 达到 2.4dS/m 牧草没有明显减产。为了防止盐分在土壤中累积达到对作物产生危害的水平, 应当将土壤中过多的可溶性盐分淋洗到根层以下, 因此, 灌溉水必须满足淋洗需水量的要求<sup>[12]</sup>。在 Shepparton 地区, 灌溉土壤的低透水性影响水和可溶盐的下渗运动, 从而限制了灌溉水量, 所以在进行劣质水灌溉时, 采取合理的灌溉管理和改善透水性能的措施, 对于控制地下水位, 防止土壤次生盐渍化以及保持良好的土壤生态环境是非常重要的。

本文研究了不同灌溉水质和一定的灌溉管理对土壤水盐动态、淋洗比以及牧草生长的影响, 并提出一些相应的建议。

## 一、材料和方法

试验研究在澳大利亚维多利亚州北部的灌溉及盐渍化研究所进行。土壤类型为 Lemnos 壤土, 分

\* 本文是作者作为访问学者在澳大利亚灌溉及盐渍化研究所的部分研究工作。工作期间得到 D. W. West 博士的指导和帮助; 本文初稿曾得到祝寿泉研究员指正, 特表谢意。

类为红棕壤 (Red-brown earth)<sup>[8]</sup>。这种土壤具有浅的壤上表层和粘重的 B 层, 土壤部分物理性质见表 1, 土壤盐分组成列于表 2。试验地区地下水位变化于 1.0—1.5m 之间, 灌溉或大的降雨之后可短时间达到离地表 20—30cm, 局部地区出现积水。用于灌溉的渠道水和地下水的盐分状况列于表 3。该地区属半干旱半湿润气候类型, 夏季干旱冬季多雨, 年平均降雨量 483mm, 蒸发量 1407mm, 灌溉季节 (10 月至翌年 3 月) 蒸发量占全年的 78%, 降雨量占全年的 34%, 在此期间不进行灌溉的牧场呈现一片枯黄, 所以灌溉对这个地区的农牧业生产显得特别重要。

灌溉试验共设 6 个处理 (表 4) 和 4 个重复, 每个小区面积 4m×6m, 小区之间有 2m 宽隔离区, 作物为白三叶草。用渠道水稀释高含盐地下水得到不同含盐量灌溉水。当蒸发皿的蒸发量 ( $E_p$ ) 减去降雨量 ( $R$ ) 超过 60mm 时进行灌溉, 每次灌水 70mm, 每月灌溉 2—3 次。根据土壤盐分分析结果, 按照表 4 所列灌溉处理的要求, 调整灌溉水含盐量。在 1987—1988 灌溉季节, 改变灌溉水含盐量的时间分别是: 处理 4、5 在 1987 年 12 月 31 日, 处理 2、6 在 1988 年 1 月 22 日; 1988—1989 灌溉季节改变灌溉水含盐量的时间分别是: 处理 4、5 在 1988 年 12 月 20 日, 处理 2、6 在 12 月 29 日。改变灌溉水含盐量的目的是控制土壤盐分累积不致过高, 以免影响作物生长, 防止土壤次生盐渍化。

试验期间, 每月取一次土壤和牧草样品, 分析土壤盐分和水分变化以及牧草盐分和产量变化。用土壤饱和浸提液测定电导率 (EC<sub>e</sub>) 和盐分组成, 植物成分和干重用常规方法测定。在不同处理的小区中安装土壤盐分传感器和水分张力计, 用以原位测定土壤盐分和水分变化。每周观测 1 或 2 次, 同时安装地下水位观测并测量地下水位变化。另外, 电磁感应电导仪 (EM-38)<sup>[9]</sup> 也被用于测定土壤盐

表 1 试验地区土壤的部分物理性质

Table 1 Selected physical properties of the experimental soil

深度 Depth (cm)	粒 径 Particle size distribution (%)			容 重 Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay	
	2—0.02mm	0.02—0.002mm	<0.002mm	
0—10	51.3	27.0	21.7	1.52
10—15	44.1	28.7	27.2	1.58
15—30	30.2	23.4	46.4	1.62
30—45	24.7	23.2	52.1	1.63
45—60	23.5	28.1	48.4	1.61
60—120	35.7	33.5	30.8	1.64

表 2 试验地区土壤的化学性质

Table 2 Selected chemical properties of the experimental soil

深度 Depth (cm)	饱和浸提液电导率 EC <sub>e</sub> (dS/m)	盐分离子含量 Ion content (cmol/kg)					SAR
		Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
0—15	0.78	1.1	1.3	0.2	3.6	0.7	1.04
15—30	0.55	0.9	1.1	0.1	2.1	0.4	0.70
30—60	0.45	0.8	1.2	0.1	1.1	0.6	0.93
60—90	0.51	0.6	1.0	0.1	1.2	0.8	0.71
90—120	0.34	0.6	0.9	0.1	0.6	0.6	0.80
120—150	0.49	0.7	1.7	0.2	0.6	1.2	1.27

分变化。0—70cm 土层盐分和水分状况是主要研究对象,因为牧草根系的 80% 分布在 0—60cm 深度<sup>71</sup>。

表 3 用于灌溉的渠道水和地下水的化学成分

Table 3 Chemical composition of channel water and ground water used for irrigation

水 源 Water source	EC (dS/m)	离子含量 Ion content (mmol/L)							
		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
渠道水	0.1	0	0.32	0.47	0.05	0.44	0.06	0.08	0.12
地下水	4.79	0	1.51	43.2	2.39	34.36	0.18	1.29	6.19

表 4 灌溉处理

Table 4 Irrigation treatments

处 理 Treatment	灌溉水盐分 Irrigation water salinity (mg/L)	说 明 Explanation
1	100	含盐量不变
2	1500 减少到 100	当干土含氯量达到 1000mg/kg 时
3	1500	含盐量不变
4	3000 减少到 100	当干土含氯量达到 1000mg/kg 时
5	3000 减少到 1500	当干土含氯量达到 1000mg/kg 时
6	3000 减少到 100	当干土含氯量达到 1500mg/kg 时

## 二、结果与讨论

### (一) 土壤水分动态

图 1 表示灌溉前后土壤水分张力的变化。试验地区从 9 月底开始气温逐渐升高,降雨量减少,蒸发变强。表层土壤在强烈蒸发下明显变干,至 10 月 10 日前后 15 cm 深处土壤水分张力值可达到 30—40 kPa。10 月中旬开始灌溉季节。灌水之后 6—8 小时 70mm 灌溉水可全部渗透进入土壤,30cm 以上土层土壤水分张力迅速降低,土壤含水量达到或接近饱和。灌水之后 2 天 50—70cm 土层土壤水由负压变为正压。重力水通过土壤毛细孔隙和植物根孔从表层逐渐向下运动,当入渗水量超过原地下水位以上土层的田间持水量时,即引起地下水位上升,这时土壤剖面处于饱和或过饱和状态。随着重力水下移和表层土壤强烈蒸发,土壤含水量逐渐降低,灌水之后 10—15 天表层土壤水分张力上升到 25—35kPa,这时  $E_p-R$  大于 60mm,需要进行下一次灌水。同样,在大的降雨之后,土壤水分张力在剖面上的变化与灌水之后相类似。土壤水分的变化明显与地下潜水动态一致。虽然地下水泵站离试验小区仅 50m,由于红棕壤透水性差和粘土夹层的阻隔以及抽水井较深(约 35m)等原因,经常性抽水对试区潜水位并无显著影响。

### (二) 盐分累积和淋洗

传感器测定的土壤盐分(EC)变化由图 2 表示(处理 6)。由于夏季频繁灌溉和秋冬季多雨,引起盐分在土壤剖面累积和淋洗反复交替进行,并且在 70cm 深处明显累积。试验之前土壤盐分相当低(EC<sub>0</sub> 约 0.5—1.0dS/m)且分布较均匀。经过两个半月含盐量

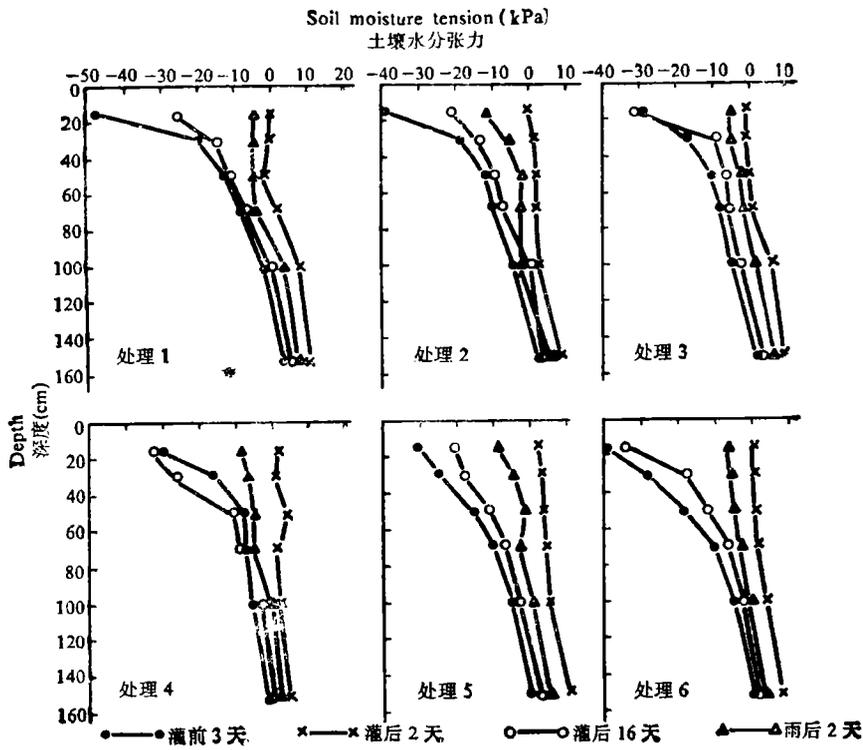


图 1 灌溉前后土壤水分张力的变化

Fig.1 Changes of soil moisture tension before and after irrigation

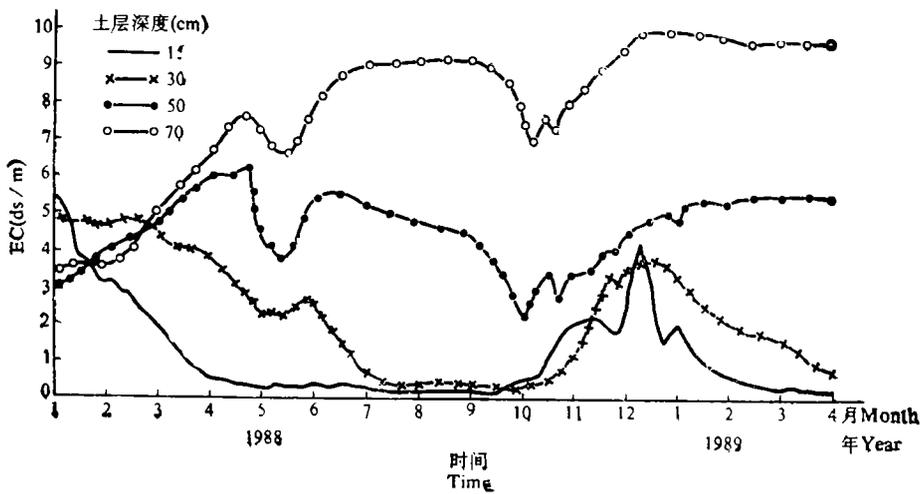


图 2 土壤剖面不同深度盐分的变化

Fig.2 Change of soil salinity at various depths with in the soil profile

3000mg/L 灌溉水灌溉之后, 土壤盐分显著增加, 15、30、50 和 70cm 土层土壤溶液电导率分别上升到 5.4、4.9、3.0 和 3.5ds/m。当灌溉水由 3000mg/L 改变为 100mg/L 之后, 表层土壤盐分开始淋洗和降低, 淋洗深度逐渐增加。灌溉季节结束时 15cm 土层盐分降

低至 0.5ds/m 以下, 秋冬季节(4—8月) 15cm 以下土层由于降雨而继续淋洗, 7月中旬 30cm 深处土壤盐分亦降至 0.5ds/m。50cm 深处盐分于 4月中旬由累积转变为淋洗, 9月底降至 2ds/m, 而 70cm 深处除晚冬和初春出现短时间轻微淋洗之外, 整个试验年度盐分累积占主导地位, 经过一年时间土壤溶液电导率上升至 10ds/m。渠道水灌溉的处理, 在试验期间一直处于淋洗脱盐状态。其他处理土壤盐分的变化趋势与处理 6 大致相同, 即在较高含盐量水灌溉季节盐分在土壤剖面自上而下增加, 当改变灌溉水为低含盐量之后或在冬季多雨期间, 盐分又自上而下淋洗, 因此盐分在土壤中累积和淋洗交替进行。由取样分析得到的结果(图 3) 与传感器测量的结果相似。从图 3 可以看出, 轻微的盐分淋洗发生在表层土壤, 表层以下盐分累积随深度而增加, 盐峰明显出现在 60—90cm 深处。6 个处理 0—90cm 土壤剖面盐分分析结果显示, 灌溉试验一年期间, 处理 1 (灌溉水含盐量 100mg/L) 土壤盐分由于淋洗而减少 23%, 其他处理盐分都有不同程度增加, 处理 5 增加最多达到 185%, 增加幅度与灌溉水带进土壤的盐量相一致。土壤盐分的增加, 特别是在 60—90cm 土层明显累积, 主要是由于红棕壤及其粘重的底土层阻碍含盐灌溉水的下渗和盐分淋洗, 而引起盐分累积。

### (三) 淋洗比 (LF)

根据盐分平衡原理, 假定从土壤矿物中溶解出的盐分极少, 因沉淀作用和牧草收割而失去的可溶盐分可以忽略不计, 灌溉水在田间均匀分布, 而且没有降雨或降雨很少, 那么在稳态条件下, 因灌溉进入根层土壤的盐分应与排水流出根层的盐分相平衡<sup>[10,12]</sup>。盐分平衡方程经简化变为:

$$D_i C_i - D_d C_d = 0 \quad (1)$$

淋洗比为:

$$LF = D_d / D_i = C_i / C_d = EC_i / EC_d \quad (2)$$

式中:  $D$  是水量 (mm/年),  $C$  是盐分浓度 (mg/L),  $EC$  是电导率 (ds/m),  $i$  和  $d$  分别代表灌溉和排水。

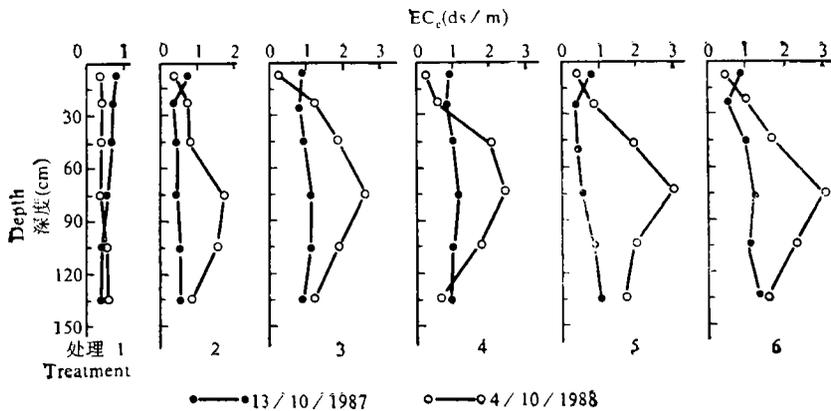


图 3 不同水质灌溉 1 年之后土壤盐分的变化

Fig.3 Changes of soil salinity after irrigation with water of different qualities for one year

从方程(2)可以看出,淋洗比(LF)是在进行含盐水灌溉或盐渍土冲洗时灌溉水通过根层排出去的水量与灌溉进入土壤的水量之比,其值和灌溉水电导率与排出水电导率之比相等,改变这个比值就可能控制排水电导率以及电导率在根层的分布。本文所述排水电导率  $EC_d$  是由三种方法测定,即取样分析,埋设于田间的盐分传感器和 EM-38 电磁感应电导率仪。表 5 给出一年期间不同处理的淋洗比(LF),用三种方法测定的  $EC_d$  由公式(2)计算的淋洗比基本相近似,小的差异主要是由于测定  $EC_d$  的不同方法的局限性所影响。可以看出,淋洗比取决于灌溉水的含盐量和灌溉进入土壤的总盐量,含盐量和总盐量愈高,淋洗比愈大,这一结果与 Bresler<sup>[2]</sup> 和 Lyle<sup>[4]</sup> 的研究结果相类似。淋洗比随灌溉水含盐量而增加的主要原因是增加灌溉水含盐量可以提高土壤有效孔隙率,导致水

表 5 不同灌溉处理的淋洗比

Table 5 Leaching fractions obtained in different treatments

灌溉处理 Irrigation treatment		淋洗比 Leaching fraction (%)		
No.	灌溉水含盐量 (mg/L)	取样分析	盐分传感器	EM-38
1	100	3	—	2
2	1500—100	15	14	17
3	1500	23	24	24
4	3000—100	16	18	16
5	3000—1500	25	27	26
6	3000—100	17	22	18

力传导度增大<sup>[11,14]</sup>。另外, Mehanni<sup>[5]</sup> 的研究认为当灌溉水含盐量大于 1500mg/L 时,将影响作物正常生长,引起植物蒸腾减少和土壤剖面变湿,从而增加灌溉水下渗运动。

#### (四) 灌溉水质对土壤盐分组成的影响

试验进行一年之后,土壤中氯和钠离子含量变化如图 4 所示,较高浓度出现在 60—90cm 土层,这与总盐分(EC)的变化一致。氯离子浓度在表层轻微降低,钠离子在土壤

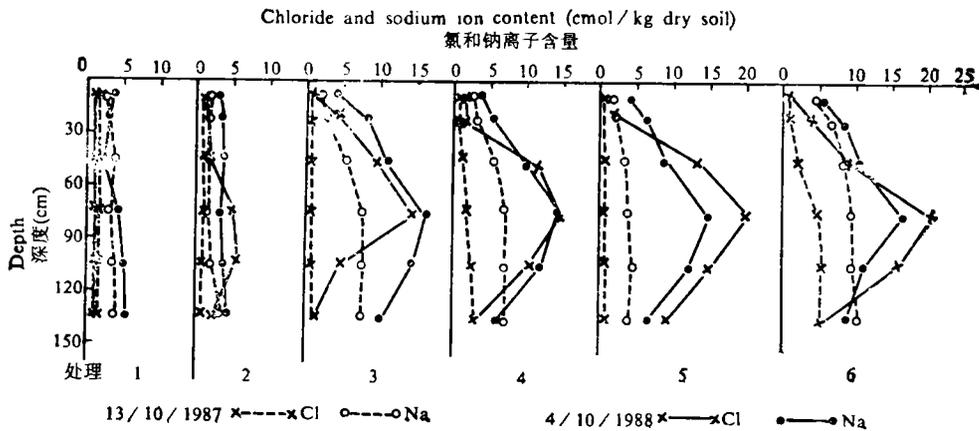


图 4 不同灌溉水质灌溉 1 年之后土壤中氯和钠离子含量的变化

Fig. 4 Change of chloride and sodium ion contents in the soil after irrigation with water of different qualities for one year

表 6 灌溉 1 年前后土壤中钠吸附比 (SAR) 的变化

Table 6 Change of SAR in the soil before and after irrigation for one year

深度 Depth (cm)	处 理 Treatment											
	1		2		3		4		5		6	
	灌 前	灌 后	灌 前	灌 后	灌 前	灌 后	灌 前	灌 后	灌 前	灌 后	灌 前	灌 后
0—30	1.0	4.0	1.0	7.0	2.0	9.0	2.0	8.0	1.0	12.0	1.0	10.0
30—90	2.0	3.0	2.0	4.0	4.0	8.0	5.0	7.0	2.0	10.0	3.0	8.0

中包括表层均有明显增加, 钙镁离子从表层向下淋洗较显著。这些盐分的变化导致钠吸附比 (SAR) 增加(表 6)。6 个处理 SAR 都有不同程度增加, 表层较深层增加幅度大, 灌溉水含盐量高的处理比含盐量低的增加显著。其中处理 1 SAR 增加最少(从 1 增至 4), 处理 5 增加最多, (SAR 从 1 增至 12)。SAR 增加与灌溉水盐分含量和组成以及淋洗过程中离子的移动有关。钙镁离子的淋洗和钠离子的累积促进了 SAR 值的增加。根层土壤中过多的钠将危害作物生长和破坏土壤结构, 然而, 在 6 个试验处理中 SAR 都在 12 以下, 尚未对牧草生长和土壤理化性质产生明显影响, 但是如果继续进行灌溉, 必须对 SAR 增加的趋势给予足够重视, 采取一定的改良措施, 防止其达到有害水平。

#### (五) 牧草茎叶中的盐分和牧草产量

取样分析表明, 在不同水质灌溉期间, 三叶草茎叶中的盐分随灌溉水浓度增加而增加, 试验结果类似于其他一些研究<sup>[1,3,7]</sup>。但是, 当灌溉水盐分由高浓度改变为低浓度之后, 茎叶中氯和钠浓度亦随之减小(见图 5)。盐分含量的峰值出现的时间与每个试验处理改变灌溉水含盐量的时间一致, 峰值大小与灌溉水含盐量密切相关。表层土壤中盐分

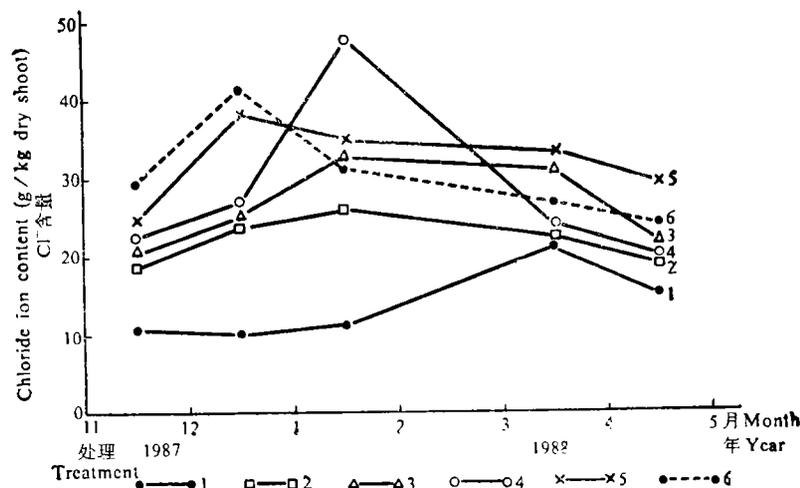


图 5 不同灌溉处理对三叶草茎叶中氯含量的影响

Fig.5 Effects of different irrigation treatments on chloride content of clover shoot

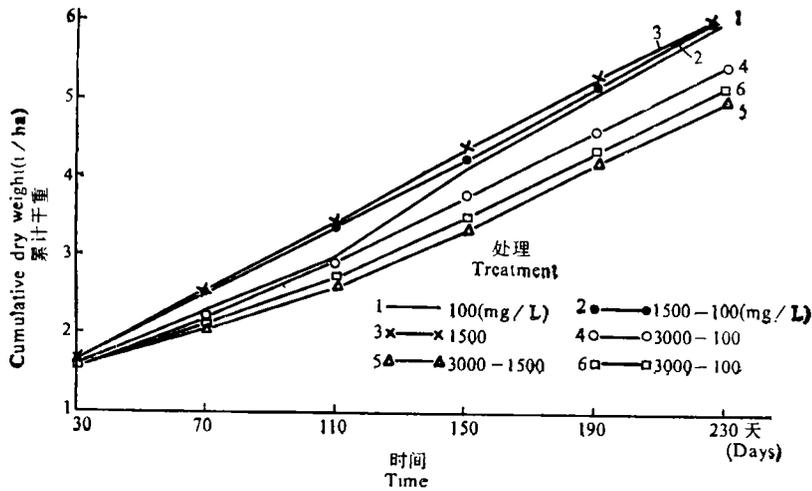


图 6 灌溉水质对牧草产量的影响

Fig. 6 Effect of irrigation water quality on pasture yield

累积与淋洗交替进行,灌溉试验一年之后每个处理茎叶中氯和总的盐分浓度趋于减少,而钠浓度趋于增加。氯和总的盐分浓度与灌溉水的含盐量同样有密切的相关关系,相关系数分别为 0.94 和 0.86。而茎叶中钠的增加以及钾、钙和镁浓度减少主要与淋洗过程中盐分离子的迁移和分异有关。图 6 表示 1987—1988 灌溉年度牧草产量的累计干重。可以看出,不同灌溉水质和处理对牧草生产的影响有一定差异,处理 1,2 和 3 牧草产量比较接近,而且高于处理 4,5 和 6。显然,灌溉水含盐量 1500mg/L 对牧草产量没有影响,含盐量达到 3000mg/L 会影响牧草产量,其中处理 4 减产 9%,处理 6 减产 14%,处理 5 减产 17%。由于灌溉管理和控制盐分灌入量的措施,其减产幅度比先前的一些研究<sup>[6,7]</sup>变小。此外,虽然处理 4 和 6 在整个灌溉季节灌入的盐量近似于处理 3,但由于处理 4 和 6 前 4—6 次灌溉水含盐水平较高 (3000mg/L),而使牧草生长受到一定危害,因而产量低于处理 3。

根据以上所述,在 Shepparton 地区发展劣质水灌溉,需要采取合理的灌溉管理及改善土壤排水条件和渗透性能措施以及其他改良措施,从而保持水分和盐分的下渗运动以及耕层土壤良好的理化性质。这些措施包括:

1. 建立浅而密的竖井与暗管或明沟相结合的灌溉排水系统,由此改善潜层土壤排水状况,降低潜层地下水位;
2. 根据淋洗比和淋洗需水量的要求,建立合理的灌溉管理制度,调节和控制灌入水量和盐量,既保持耕层土壤盐分不超过规定值,又避免过量灌溉引起地下水位上升;
3. 进行深耕深翻打破粘土隔水层,增加土壤渗透性能和淋洗效果;
4. 灌溉水含盐量达到 3000mg/L 时需与渠道水(淡水)混合后再行灌溉,控制灌溉水及土壤含盐量在对作物产生危害的水平以下;
5. 在劣质水灌溉的同时,增施有机肥料,增加土壤有机质,适当加入石膏或其他酸性改良剂到灌溉水或土壤中,防止土壤性质变坏和次生碱化现象发生。

## 参 考 文 献

1. Bernstein L. and Francois LE. 1973: Leaching requirement studies: Sensitivity of alfalfa to Salinity of irrigation and drainage waters Proc. Soil Sci. Soc. Am., 37:931.
2. Bresler E., McNeal B. L. and Carter D. L. 1982: Saline and Sodic Soils, New York: Springer-Verlag.
3. Chang C. W. 1961: Effects of saline irrigation water and exchangeable sodium on soil properties and on growth and cation content of alfalfa and cotton. Soil Sci., 91:29.
4. Lyle CW., Mehanni A. H. and Repeys A. P. 1986: Leaching rates under a perennial pasture irrigated with saline water. Irrig. Sci., 7:277—286.
5. Mehanni A. H. and Chalmers D. J. 1986: Effect of irrigation with saline water on soil properties and salinization of perennial pasture soils, Aust. J. Exp Agric., 26:173—179.
6. Mehanni A. H. and Repeys A. P. 1986: Perennial pasture production after irrigation with Saline groundwater in the Goulburn Valley, Victoria, Irrig. Sci., 7:277—286.
7. Noble C. L. Hunter C. C. and Wildes R. A. 1987: Irrigation of lucerne with saline groundwater on a slowly permeable duplex soil. Irrig. sci., 8:35—48.
8. Northcote KH. Hubble. GD., Isbell, RF., Thompson CH., and Bettenay E. 1975: A description of Australia soils, CSIRO, Melbourne. pp. 102—115.
9. Rhoades J. D. and Corwin, 1981: Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:255—260.
10. Rhoades J. D. 1974: Drainage for salinity control. In: Van Schilfhaarde, J(ed) Drainage for agriculture. Am Soc. Agron. Monogr., 14:433—461.
11. Shainberg I. and Singer M. J. 1985, Effect of electrolytic concentration on the hydraulic properties of depositional crust, Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1260—1263.
12. US Salinity Laboratory Staff, 1954: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, USDA. Handbook No. 60.
13. Wooley D. R, 1988: Groundwater use in the Murray Basin, BMR. J. Aust. Geol Geophys. Groudwater 12, 179—182.
14. Xiao Zhenhua, Prendergast B. and Rengasamy P., 1992: Effect of irrigation water quality on soil hydraulic conductivity. Pedosphere, 2(3):pp. 237—244.

## EFFECT OF IRRIGATION WATER QUALITY ON SALT-WATER DYNAMICS OF SOILS

Xiao Zhenhua

*(Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing, 210008)*

B. Prendergast, C. L. Noble

*(Institute for Irrigation and Salinity Research, Australia)*

### Summary

Effects of irrigation water quality on salt-water dynamics of red-brown earth and perennial pasture production were studied. Irrigation water with salinities of 100, 1500 and 3000mg/L and six different irrigation treatments were adopted in the experiment. Salt was accumulated in the soil during the season of irrigation with water of high soluble salt concentration and partly leached away during irrigation with water of low soluble salt concentration and winter rainfall. The total soluble salts, chloride and sodium ions, appeared to be higher in the 60—90cm horizons than other horizons in the soil profile due to repeated accumulation and leaching and the low permeability of clay horizon.

The sodium adsorption ratio (SAR) of the soil and the salt concentration of the white clover shoots increased with the soluble salt concentration of irrigation water. Pasture yield was not significantly affected by irrigation water with a salt concentration up to 1500mg/L and only reduced by about 9% to 17% at the salt concentration of 3000mg/L under different irrigation conditions. It is evident that irrigation management could play a certain role in regulating salt-water dynamics of soils.

**Key words** Irrigation water quality, Leaching fraction, Salt accumulation, Salt-water dynamics, Sodium adsorption ratio (SAR)