

灌溉水质对土壤水力性质 和物理性质的影响*

肖 振 华

万 洪 富

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(广东省土壤研究所, 广州 560650)

摘 要 本文研究了灌溉水质对田间原状土壤非饱和导水率的影响及其机理。研究结果表明, 灌溉水质对土壤导水率有显著影响, 随灌溉水矿化度增加, 土壤导水率变大, 而灌溉水钠吸附比(SAR)则有相反的作用, SAR愈高, 土壤导水率愈低。本文还研究了灌溉水非常低的矿化度对土壤导水率产生的不可逆效应以及表土和底土导水率的差异, 同时还研究了灌溉水质对土壤物理性质的影响。

关键词 灌溉水质, 土壤导水率, 物理性质

中图分类号 S156.4

灌溉水资源短缺是干旱半干旱地区农业持续发展中的一个重要限制因素, 开发各种水资源特别是劣质水(微咸水, 咸水和碱性水)用于灌溉越来越受到重视^[1,2]。在劣质水灌溉利用中, 不当的灌溉管理会造成土壤理化特性变差, 引起土壤次生盐碱化从而导致土地生产力水平下降, 使生态环境恶化。因此, 劣质灌溉水的合理利用和土壤退化的防治问题受到广泛的注意。国内外不少学者在劣质水灌溉的增产效果和改良利用方面做了大量有益的工作^[3-5], 对于灌溉水质对土壤化学特性和作物生长的影响也进行了较多研究, 而对土壤水力性质影响的研究相对较少。灌溉水质对土壤物理性质的有害影响最明显的表现是其渗透性变差^[6]。在地下水控制和农业土壤管理以及土壤水盐运动的研究中, 土壤导水率(k)是一个重要参数, 因此, 不同灌溉水质对土壤物理性质特别是对土壤水力特性的影响成为重要的研究课题之一。目前, 世界上多以盐害和碱害作为主要指标对灌溉水质进行评价。盐害以总盐分浓度(矿化度)为标准, 碱害多以吸附性钠含量(钠吸附比 SAR)为标准。灌溉水质对饱和土壤导水率的影响, 一些学者曾做过较多研究^[7], 对非饱和土壤导水率影响的研究也有一些文献^[8], 但是多数研究工作是用扰动土样进行, 而扰动土壤与田间原状土壤导水率有较大差异。本文以灌溉水矿化度和钠吸附比(SAR)为主要指标, 研究灌溉水质对田间原状土壤导水率的影响及其机理, 同时也研究灌溉水质对土壤物理性质的影响。

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49271044)。

收稿日期: 1997-03-24; 收到修改稿日期: 1997-10-20

1 试验条件与方法

1.1 供试土壤

灌溉水质试验研究在中科院封丘农业生态实验站进行,土壤为发育在黄河冲积母质上的黄潮土,是封丘县的主要耕作土壤,占全县土地总面积的 77.6%。16 个灌溉处理,有 48 个测筒试验不同灌溉水质对土壤理化性质的影响。测定土壤导水率的原状土样取自于田间的这类土壤。取样点选在代表性田块的中间,A 组三个土样取自地表以下 5—15cm,B 组三个土样取自 15—25cm。原状土样由不锈钢环刀采集,环刀直径 10.0cm,高 8.3cm。供试土壤的物理性质和灌溉水的化学性质分别列于表 1 和表 2。供试水样基本上代表了当地不同类型的灌溉水。

表1 供试土壤的物理性质

Table 1 Physical properties of the experimental soil

土样编号 No.	颗粒组成 (g/kg) Particle size distribution				容重 (g/cm ³) Bulk density
	1—0.25mm	0.25—0.05mm	0.05—0.01mm	<0.01mm	
土样A	1.0	128.2	576.0	294.8	1.30
土样B	—	140.0	563.0	297.0	1.50

表2 灌溉水的化学性质

Table 2 Chemical properties of irrigation water

灌溉水编号 Irrigation water No.	矿化度 Mineralization degree	钠吸附比 SAR	灌溉水编号 Irrigation water No.	矿化度 Mineralization degree	钠吸附比 SAR
1	0.1	5	5	2.7	14
2	1.0	5	6	2.7	22
3	2.7	5	7	2.7	30
4	6.0	5			

1.2 试验方法

不同灌溉水质对原状土壤非饱和导水率的影响由圆盘渗透计(Disc permeameter)^[9]测定,图 1 为用圆盘渗透计测定土壤导水率的装置示意图,主要包括渗透计,张力台和出水端调控负压的马氏瓶三部分,渗透计由储水管,负压调控管和渗透圆盘组成。非饱和土壤水的运动受很多因素的影响,是一个非常复杂的物理过程。为简化起见,在本文试验研究条件下,假定土壤是均质土壤,忽略侧向水分运动,水分在土壤中的运动为垂直一维流动,本实验装置测定的是一维稳定流的土壤导水率。在均质土壤中,垂直一维非饱和水流可以由达西方程表示:

$$q = kh / dz \quad (1)$$

其差分形式为:

$$q = k\Delta h / \Delta z \quad (2)$$

式中: q 为水流通量,即单位时间单位面积通过的水量 (mm / h); Δh 为土样上下水头差 (cm),其值等于 $h_1 - h_2$; Δz 为土样高度 (cm)。

在稳定流态中,水流量 q 和水力梯度 $\Delta h / \Delta z$ 不随时间而变化,测出 q 和 $\Delta h / \Delta z$ 就可以通过达西方程算出相应的导水率 k :

$$k = q / \Delta h / \Delta z \quad (3)$$

实验在室温摄氏 20 度左右条件下进行。实验开始之前,先将土样用实验水饱和,张力台出水端负压力调控至零,台面均铺三层滤纸,其上为 1cm 厚硅藻土,将饱和土样放置其上,土样上表面覆盖 0.5cm 厚硅藻土。张力台及出水管系统中不得有气泡存在。将出水端负压水头调至初始值 (2.0cm 水柱)。圆盘渗透计储水管用实验水充满,负压力由负压调控管调至与出水端初始负压值相同 (2.0cm 水柱)。实验开始时,打开渗透计负压调控管的进气阀,在水头差 Δh 的作用下,渗透计储水管中的水通过土样从出水端流出,定时记录渗透时间和渗透水量,计算其水流量 q ,当三次结果相同时,即认为达到稳定出流,利用公式 (3) 即可算出导水率 k 值。逐步加大负压水头,测定并计算其相应的导水率,由于渗透计所用渗透膜的进气压力为 20cm 水柱,因此,本实验取最大负压水头为 16cm。完成一个水样测定之后,更换第二个水样,重复上述步骤就可以得到不同土样和不同水样在不同负压水头条件下的导水率值。

土壤物理性质是在 48 个测筒中测定的。这些测筒的土壤在实验之前具有相同的物理性质,经过三年不同水质灌溉实验之后,取原状土样测定其容重和饱和含水量,用土壤坚实度仪原位测定表层土壤的坚实度,以检验灌溉水质对土壤物理性质的影响。

2 结果与讨论

2.1 灌溉水矿化度对土壤非饱和导水率的影响

由相同钠吸附比 ($SAR = 5$) 和不同矿化度的灌溉水分别测定原状土样的导水率。图 2 为 A 组土样测定结果的平均值。可以看出,随着灌溉水矿化度增加,在不同土壤水负压力条件下,土壤导水率均有明显增大,土壤水负压力愈低,导水率增大愈显著。当负压为 0.2kPa (接近饱和状态),灌溉水矿化度由 0.1 增至 6.0g / L 时,土壤导水率由 2.6 增加 3.87mm / h,提高 50% 左右。灌溉水矿化度愈高,土壤导水率愈高。同样,当土壤负压力为 1.6kPa 时,土壤导水率由 0.75 增加至 1.4mm / h,增加近一倍。

2.2 灌溉水钠吸附比 (SAR) 对土壤导水率的影响

碱性水或低矿化碱性水含有较高的吸附性钠,这类水用于灌溉会对土壤性质产生不

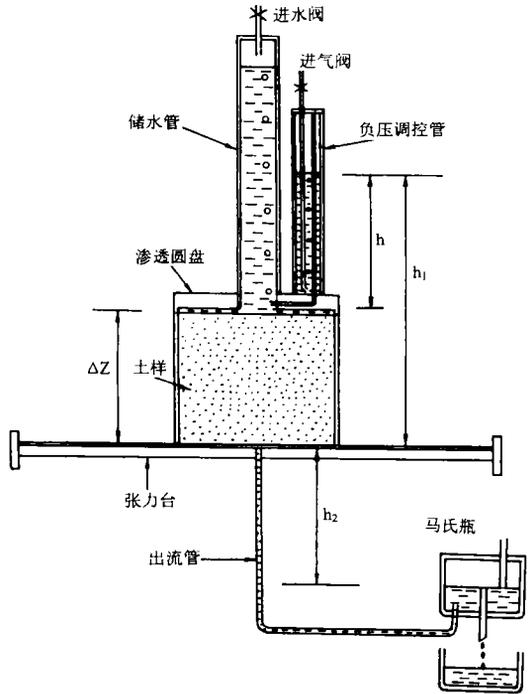


图 1 圆盘渗透计测定土壤导水率的装置示意图

Fig.1 Apparatus for measuring soil hydraulic conductivity by the disc permeameter

利影响。灌溉水钠吸附比对土壤导水率的影响由图 3 说明。在土壤水负压力为 0.2kPa 条件下,当灌溉水矿化度为 2.7g / L,钠吸附比由 5 增至 14 和 30 时,土壤导水率分别降低 4.4% 和 21.4%。同样的灌溉水矿化度和钠吸附比,当负压力为 1.2kPa 时,土壤导水率分别降低 6.4% 和 28.5%。

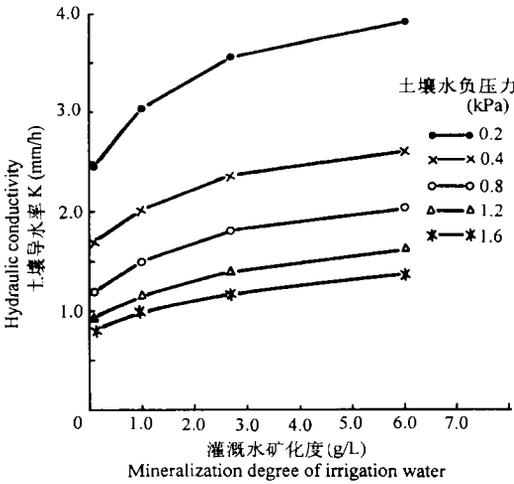


图 2 灌溉水矿化度对土壤导水率的影响

Fig.2 Effect of mineralization degree of irrigation water on soil hydraulic conductivity

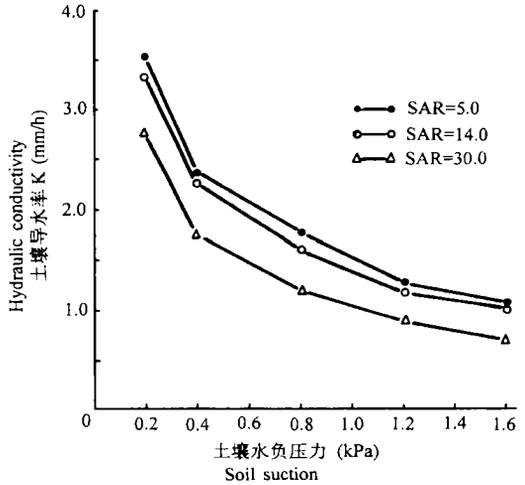


图 3 灌溉水钠吸附比(SAR)对土壤导水率的影响

Fig.3 Effect of SAR of irrigation water on soil hydraulic conductivity

2.3 灌溉水非常低的矿化度对土壤导水率的影响

非常低矿化度的灌溉水对土壤导水率的影响由图 4 说明。土样 A 先用矿化度 6.0g / L 的灌溉水测定导水率作为其初始值,然后用非常低矿化度(0.1g / L)的水测定,发现其导水率有显著降低,土壤水负压力为 0.2 和 1.6kPa 时,导水率分别降低 55.0% 和 41.0%。当土样再次用含盐量为 6.0g / L 高矿化水测定时,导水率虽有增加,但难以恢复到原先的水平,在同样负压力条件下,导水率分别降低 27.0% 和 21.0%。这个降低并非滞后效应,而是由于非常低矿化度的灌溉水引起土壤粘粒分散和移动,堵塞部分孔隙所致。

2.4 表土和底土导水率的差异

图 5 说明表土 A 和底土 B 导水率的差异。在同样矿化度(2.7g / L)和钠吸附比值(SAR = 5)的灌溉水条件下,当土壤水负压力为 0.2 和 1.6kPa 时,土样 B 比土样 A 导水率分别降低 47.0% 和 39.0%,说明底土的导水率明显低于表土的导水率,这是由于两者孔隙大小和分布不同的结果。

2.5 灌溉水质对土壤物理性质的影响

经过三年田间灌溉实验之后,16 个实验处理的土壤容重,饱和含水量和土壤坚实度列于表 3。可以看出,由于灌溉水矿化度增加或钠吸附比增大,引起土壤容重增加和饱和含水量降低,其中以 0—5cm 土层变化较明显,10—20cm 土层变化较小。随土层深度的变化趋势是,表层(0—5cm)土壤容重较小,饱和含水量较大,底土层(10—20cm)容重较大饱和

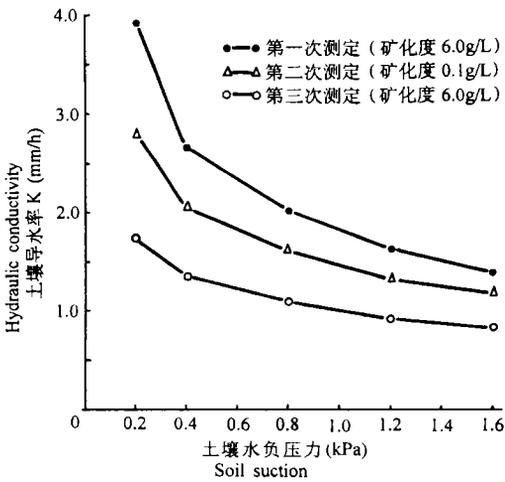


图 4 非常低矿化度灌溉水对土壤导水率的影响

Fig.4 Effect of irrigation water with a very low mineralization degree on soil hydraulic conductivity

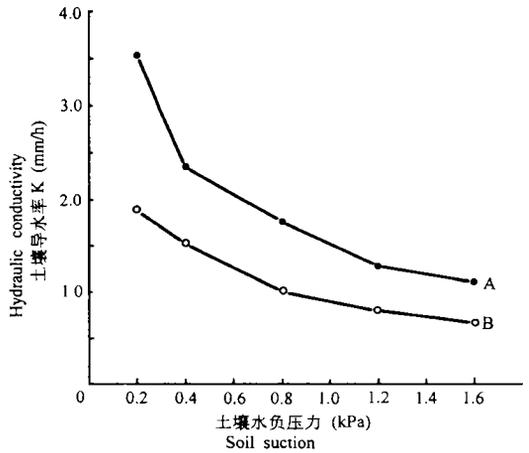


图 5 表土(A)和底土(B)导水率的差异

Fig.5 Difference of hydraulic conductivity between surface soil (A) and subsoil (B)

表3 灌溉水质对土壤物理性质的影响

Table 3 Effect of irrigation water quality on physical properties of the soil

处理号 Treatment No	矿化度 (g/L) Mineralization degree	钠吸附比 (SAR)	容重 (g/cm ³) Bulk density			饱和含水量 (%) Saturated water capacity			坚实度 Hardness (kg/cm ³)
			0—5	5—10	10—20	0—5	5—10	10—20	
			(cm)						
1	0.45	5	1.21	1.30	1.45	38.8	35.1	29.6	0.80
2	0.98	5	1.21	1.31	1.43	40.9	36.4	30.1	0.92
3	2.80	5	1.22	1.34	1.44	36.3	34.7	29.6	0.93
4	4.33	5	1.23	1.35	1.44	35.5	34.4	29.8	1.03
5	5.90	5	1.25	1.34	1.45	34.8	33.6	29.1	1.07
6	9.05	5	1.28	1.36	1.46	34.2	32.3	27.9	1.18
7	1.03	14	1.25	1.32	1.45	35.3	34.5	30.1	1.37
8	2.50	14	1.27	1.34	1.47	34.1	33.2	28.1	1.45
9	5.34	14	1.30	1.38	1.48	32.4	31.3	26.6	1.52
10	2.58	22	1.26	1.31	1.45	34.3	33.4	30.4	1.25
11	3.77	22	1.30	1.32	1.47	33.9	32.8	28.6	2.20
12	5.13	22	1.34	1.34	1.49	33.3	31.4	26.8	2.68
13	1.01	30	1.26	1.32	1.44	34.1	32.7	30.5	1.55
14	2.95	30	1.30	1.40	1.48	32.9	31.2	28.4	3.08
15	5.02	30	1.30	1.42	1.47	31.4	31.0	27.3	3.25
16	7.71	30	1.34	1.44	1.50	30.9	27.6	26.4	3.51

表4 不同实验处理各项测量误差的最大值

Table 4 Maximal value of measurement error in different treatments

测量误差 Measurement error	矿化度对 K 值 的影响 Effect of mineralization degree on K	钠吸附比对 K 值 的影响 Effect of SAR on K	非常低矿化度 对 K 值的影响 Effect of very low mineralization degree on K	表土和底土 K 值 的差异 Difference of K between surface soil and subsoil
标准离差 (S) (mm/h)	0.151	0.161	0.164	0.266
标准误差 (Sx) (mm/h)	0.087	0.093	0.095	0.130
变异系数 (CV) (%)	10.6	8.7	8.5	9.6

含水量较小,这主要与表层土壤耕作栽培和熟化程度较高而底土熟化程度较低有关。不同灌溉处理的表层土壤坚实度亦有明显变化。在不同灌溉水 SAR 值情况下, SAR 值愈大,土壤坚实度愈大。当灌溉水 SAR 为 5,矿化度由 0.45 增至 9.05g / L 时,土壤坚实度由 0.80 增至 1.18kg / cm³,增加近 50%。同样,当灌溉水 SAR 由 5 增至 30 时,土壤坚实度增加 2—3 倍。显然,灌溉水质对土壤物理性质有较大影响。

影响土壤导水率的因素很多,需要进行不同实验处理测量结果的误差分析。表 4 为不同处理多次测量结果测量误差的最大值。可以看出,在不同处理中,标准离差 (S) 最大者一般来自导水率较大的测量结果,例如,表土和底土导水率测量结果的标准离差最大值 (0.226mm / h),是由表土在负压 0.2kPa 时导水率的多次测量结果 (平均值为 3.60mm / h) 计算得来,但是其变异系数为 6.3%,并非最大值。由表 4 可以看出,不同实验处理导水率测定结果的最大的变异系数在 10% 左右。另外,对实验数据所作的方差分析和显著性检验表明,随机误差的概率小于 0.01,灌溉水矿化度和钠吸附比对土壤导水率的影响达到极显著水平。

上述结果可以看出,灌溉水质对土壤导水率有显著影响。由于灌溉水矿化度降低或钠吸附比 (SAR) 增加,引起土壤导水率降低,反之导水率则增大。钙 (Ca) 和镁 (Mg) 是灌溉土壤交换性复合体中最常见的阳离子,如果灌溉水钠吸附比值较高,钠 (Na) 可能成为土壤溶液中占优势的阳离子,引起土壤溶液钠吸附比值增大,使部分交换性钙和镁被钠所取代。几年的灌溉水质实验结果显示,灌溉水钠吸附比为 22 和 30,矿化度大于 3.0g / L (EC 大于 4.0ds / m) 的处理,土壤碱化度 (ESP) 大于 15%,有的达到 24.5%,土壤发生中度或强度碱化^[5],土壤透水性能变差。

土壤的物理性质对交换性离子的类型非常敏感,钙离子给土壤的物理性质以很好的影响,可以使土壤通气透水和容水性能改善,适宜于作物生长。而交换性钠过高,可以引起土壤分散和膨胀,使土壤性质恶化,出现表层土壤板结和通透性差,不利于作物出苗和生长。一般认为,10% 的交换性钠即可引起土壤分散,使土壤渗透性降低^[10]。土壤的渗透性与孔隙半径的平方成反比,由交换性钠所引起大孔隙的微小变化,对土壤的渗透性将会

产生很大影响。而另一方面,过高的盐分浓度可以阻止吸附性钠离子的分散效应。由于灌溉水钠吸附比增加和矿化度减小而引起土壤导水率降低的原因主要有两个:当灌溉水 SAR 由 5 增加至 14, 22 和 30 时(图 2),粘粒膨胀是导水率降低的主要原因,膨胀引起连通孔隙变小和阻塞导致导水率降低^[11],随着灌溉水矿化度增加,絮凝作用增强而膨胀减弱,有效孔隙增加引起导水率变大。反之,由于灌溉水矿化度减小,粘粒膨胀和反絮凝作用增强,引起土壤导水率降低。当用非常低矿化度水(0.1g/L)灌溉时,反絮凝和分散作用变大,粘粒分散和运动进入连通孔隙引起阻塞,这是导致导水率降低的另一个原因^[12,13]。膨胀过程是在高 SAR 或低矿化度或两者同时存在情况下发生的,如果重复使用先前的灌溉水,土壤导水率可以恢复到原有的水平。而粘粒分散和运动是在非常低的灌溉水矿化度情况下发生的,即使重复使用先前的灌溉水,土壤导水率也难以恢复到原先的水平,因此,前者基本上是一个可逆过程,而后者基本上是一个不可逆过程。图 4 说明了非常低的灌溉水矿化度对土壤导水率的不可逆影响。在灌溉实践中,用高矿化水灌溉往往并不明显引起土壤性质恶化,但是,经过用低矿化水灌溉或雨季之后,土壤出现板结和透水性变差,就是这个原因。

3 结论

实验研究结果显示,灌溉水质对非饱和原状土导水率和土壤物理性质的影响是明显的,可以得出如下几点主要结论:

1. 高矿化灌溉水可以提高土壤导水率,但是能对土壤带来次生盐渍化的威胁,而灌溉水矿化度过低可能引起土壤粘粒分散,导致土壤导水率降低。

2. 灌溉水钠吸附比超过 14 会引起土壤粘粒膨胀,同时,高钠吸附比会引起土壤碱化度变大产生土壤碱化,使土壤物理性质变坏,导致土壤导水率降低。

3. 用高矿化水碱性水和低矿化碱性水灌溉以及连续大量降雨对土壤盐分的过度淋洗,会使土壤出现分散板结和保水透水性能变差,土壤容重和坚实度增大,从而影响作物出苗和正常生长。

4. 保持和调节灌溉水含盐量和含钠量不致对土壤和作物产生危害的水平,增施有机肥料,提高土壤熟化程度,对改善土壤透水性能和土壤理化性质可能是有益的。

参 考 文 献

1. Rhoades J D, Kandiah A, Mashali A M. The use of saline waters for crop production, FAO, Irrigation and Drainage Paper 48, Rome, 1992
2. 方 生,陈秀玲. 河北省南皮县盐渍土井灌沟排,抽咸补淡,咸淡混浇,综合治理盐碱地. 见:王遵亲等主编. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社,1993, 546—557
3. Rhoades J D. 咸水灌溉的研究. 灌溉排水, 1987, (1): 14—17
4. Lentz R D, Sojka R E, Carter D L. Furrow irrigation water-quality effects on soil loss and infiltration. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60:238—245
5. 肖振华,Prendergast B, Noble C L. 灌溉水质对土壤水盐动态的影响. 土壤学报, 1994, 31(1): 8—17
6. Giuseppina, Grescimanno, Massinao Lovino. Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59:1701—1708

7. Shainberg I, Caiserman. Studies on Na / Ca montmorillonite systems. II: The hydraulic conductivity, *Soil Sci.*, 1971, 111:276—281
8. Russo D, Bresler E. The effect of mixed Na / Ca solutions on the hydraulic properties of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1977, 41:713—717
9. Pwrroux K M, White I. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, 52:1205—1215
10. Shinberg I, Oster J D. Quality of irrigation water. Published by the Internaional Irrigation Information Centre, 1978
11. Shainberg I, Letey J. Response of soil to saline and sodic conditions. *Higardia*, 1984, 52(2):1—57
12. Keren R, Singger M J. Effect of low electrolyte concentration on hydraulic conductivity of sodium / calcium-montmorillonite-sand system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, 52:368—372
13. Curtin D, Steppuhn H, Selles F. Clay dispersion in relation to sodicity, electrolyte concentration, and mechanical effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 955—962

EFFECT OF IRRIGATION WATER QUALITY ON SOIL HYDRAULIC AND PHYSICAL PROPERTIES

Xiao Zhen-hua

(Institute of Soil Science, Academia

Sinica, Nanjing 210008)

Wan Hong-fu

(Institute of Soil Science

Guangdong Province, Guangzhou 560650)

Summary

The effect of irrigation water quality on unsaturated hydraulic conductivity (k) of undisturbed soil and its mechanism were studied. Results showed that the higher the mineralization degree of irrigation water, the higher the soil hydraulic conductivity became. High sodium-adsorption ratio (SAR) of irrigation water would have an unfavorable effect on soil hydraulic conductivity. The irrigation water with a very low mineralization degree had an irreversible effect on soil hydraulic conductivity, inducing a significant decrease of soil hydraulic conductivity. The effect of irrigation water quality on physical properties of the experimental soil was also studied.

Key words Irrigation water quality, Hydraulic conductivity, Physical properties