

再生回用水灌溉对作物品质及土壤质量的影响

赵庆良, 张金娜, 刘志刚, 尤世界, 王绍华, 王丽娜, 薛爽

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:考查了不同水质(三级处理水、二级处理水、污水、清水作对照)灌溉对农作物(黄瓜、白菜和玉米)品质和土壤质量的影响,同时测定了灌溉后农作物的可食用部分中的氯离子、磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐以及残留的重金属含量.结果表明,三级水和二级水浇灌对作物品质无显著影响,污水浇灌可使部分营养成分含量升高,如以蛋白质为例,4种水浇灌时3种作物中蛋白质含量范围分别为:黄瓜 $0.736\ 2\sim 0.812\ 5\text{ mg/kg}$;白菜 $0.134\ 8\sim 0.164\ 5\text{ mg/kg}$;玉米 $10.28\sim 10.84\text{ mg/kg}$.污水浇灌会产生较高的硝酸盐积累,其中污水浇灌的白菜中硝酸盐含量高达 554.4 mg/kg ,已达到污染水平.三级水和二级水灌溉对作物中重金属含量影响不大,而污水浇灌会使作物中重金属发生明显的积累,因此污水不适于作灌溉水源.短期灌溉内土壤的钠吸附比(SAR)在 $3.5\sim 4.5$ 之间,表明土壤未发生明显碱化,重金属也未发生显著积累.

关键词:回用水;灌溉;水质;重金属;土壤

中图分类号:X131.3; X173 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2007)02-0411-06

Effect of Reclaimed Water Used for Irrigation on the Quality of Crops and Soil

ZHAO Qing-liang, ZHANG Jin-na, LIU Zhi-gang, YOU Shi-jie, WANG Shao-hua, WANG Li-na, XUE Shuang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Effect of different water (tertiary effluent, secondary effluent, raw sewage as well as tap water as control) used for irrigation on the qualities of crops (cucumber, cabbage and corn) and soil was investigated; meanwhile, the contents of residual chlorine ion, phosphate, nitrate and nitrite as well as residual heavy metals present in crops were studied respectively. The results demonstrated that the secondary effluent and tertiary effluent had no significant effect on the crop quality. In contrast, irrigation with raw sewage could lead to increase of partial nutrient components in the crops. If protein contents were taken as an example, the proteins for three crops corresponding to different water sources were in the range of $0.736\ 2\sim 0.812\ 5\text{ mg/kg}$ for cucumber, $0.134\ 8\sim 0.164\ 5\text{ mg/kg}$ for cabbage and $10.28\sim 10.84\text{ mg/kg}$ for corn, respectively. Irrigation with sewage produced more accumulation of nitrates (554.4 mg/kg for cabbage). Considerable effects of irrigation with secondary effluent and tertiary effluent were not observed; however, sewage was not suitable for irrigation due to an apparent accumulation of heavy metals in crops. During short-period irrigation, sodium adsorption ratio (SAR) values of soil ranged from 3.5 to 4.5 , suggesting that there was no concern on soil basification. As well, obvious accumulation of heavy metals in soils was not detectable.

Key words: reclaimed water; irrigation; water quality; heavy metals; soil

我国具有丰富的污水资源,将污水再生回用是一种有效的节水途径^[1].目前已有很多地区开展污水灌溉^[2,3],虽然污水中含有大量植物生长所需的N、P等营养物质,但也含有很多重金属、致病微生物等有害物质^[4],因此,将城市污水直接回用到农业灌溉对人体健康和环境产生很多不良影响^[5-7],尤其是重金属污染对人的健康会产生很大危害^[8,9].因此,有些地区开始将污水进行一定处理后再用于灌溉.但是再生水对作物及环境产生的影响尚不明确,人们对回用水灌溉的安全性存有很大的疑虑.因此,弄清再生水回用于农业灌溉的安全性是需要迫切解决的问题^[10,11].

本试验以清水作对照,研究城市污水、水厂二级处理出水及经深度处理后的三级水回用于灌溉对农作物品质及重金属含量的影响,同时考察了不同水灌溉对土壤中重金属残留的影响,为再生水安全回

用农田灌溉提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验以清水作对照,用不同处理程度的再生水对农作物进行浇灌.试验采用2因素设计:因素A为农作物种类,为了考察浇灌对不同种类作物的影响,本试验选择果菜类(黄瓜)、叶菜类(白菜)和粮食作物(玉米);因素B为各作物试验田的灌溉用水,分为清水、三级水、二级水和原污水4类;清水取自当地自来水(水质和普通的自来水基本相同),其余3种水取自哈尔滨市某污水处理厂(其中原污水为

收稿日期:2006-03-07;修订日期:2006-04-05

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418505)

作者简介:赵庆良(1962~),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为污水、废水处理及资源化,垃圾渗滤液处理及污泥减量, E-mail: qlzhao@hit.edu.cn

未经处理的下水管道污水,二级水为采用 A/O 工艺处理后的出水,三级水为二级处理水经过混凝、沉淀、过滤和消毒后的出水),表 1 给出了 3 种回用水的水质情况.

表 1 试验用水水质情况¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Quality of irrigation water used in the experiment /mg·L⁻¹

水质指标	三级水	二级水	原污水	农田灌溉水质标准 (GB 5084-92)
COD	35.0	50.0	249	≤150
BOD ₅	11.37	24.59	119.8	≤80
总氮	24.22	31.76	46.30	≤30
总磷	2.884	3.196	4.360	≤10
氯化物	109.2	99.91	111.4	≤250
挥发酚	<1.00	1.07	1.73	≤1.0
Cd	0.001	0.002	0.006	≤0.005(水作) ²⁾
Cr	0.005	0.005 5	0.039	≤0.1
Pb	0.001	0.002	0.016	≤0.1
Cu	0.004 5	0.006	0.028	≤1.0
Zn	0.014	0.025	0.144	≤2.0
Ni	0.004	0.005	0.012	—
Na	72.54	75.44	78.96	—
Mg	11.15	11.37	12.60	—
Ca	47.83	49.03	52.85	—
As	nd	nd	0.012	0.05
Hg	nd	nd	nd	0.001
粪大肠菌群 数/个·L ⁻¹	<2.2	17 000	2×10 ⁸	<10 000

1) nd 表示低于检出限; 2) 蔬菜尚无标准

试验所使用的农作物在哈尔滨市平房区某田间大棚中种植,春天播种,秋天成熟,历时约 6 个月.浇水时保证各植株浇灌量相同(平均每 3 d 浇 1 次,浇灌量为 2 L/株),其它生长条件均相同.生长期按田间管理进行,并在生长过程中观察记录其生长状况,收获前 2 周停止灌溉.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

作物成熟后,取样测定相关指标,所有的样品均取自作物的可食用部分.其中黄瓜和白菜按鲜样计,玉米按干样计.将每次取得 5 个点的试样混合成 1 个样品(2 kg 左右),装入洁净的聚乙烯塑料食品袋,贴上标签立刻送回实验室进行预处理.在实验室选取可食用部分,先用自来水反复清洗,再用去离子水冲洗,沥干、待测.玉米样品置于烘干机中于 85 ℃条件下烘干,磨碎,装瓶备用.土样采集选用梅花布点法,每个混合土样由 5 个分样组成,现场采集表层土壤(0~20 cm,1 kg),用四分法混合均匀后贴上标签送回实验室进行预处理.土壤样品在实验室自然风干,磨细后过 100 目尼龙筛装瓶备用.作物和土样中

重金属元素分析的前处理采用湿式消解法(消解液体积比为,HNO₃:HClO₄=4:1).

1.2.2 测定项目及方法

维生素 C(Vc):高效液相色谱法(LC-10A 型高效液相色谱仪,日本岛津公司),色谱条件为色谱柱:ODS C₁₈;流动相:0.1% 磷酸:甲醇=1:9;流速:1 mL/min;进样量:5 μL;柱温:30 ℃;紫外检测器:λ_{max}=276 nm.蛋白质:凯氏定氮法;可溶性总糖:DNS 试剂法;总磷:钼酸胺分光光度法;可溶性 Cl⁻:离子色谱法(D10NEX 4500i 型离子色谱仪,美国戴安公司);硝酸盐:紫外分光光度法(UV2550 型紫外可见分光光度计,日本岛津公司);亚硝酸盐:分光光度法(721 型分光光度计,上海第三仪器厂);重金属:原子吸收法(5300 DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪,美国 Perkin Elmer 公司).

2 结果与分析

2.1 不同水质浇灌对作物营养物质含量的影响

4 种不同品质的灌溉水对黄瓜、白菜和玉米中营养成分的影响结果如表 2 所示.结果表明,与清水相比,3 种回用水对黄瓜和白菜中 Vc 含量的影响不大,只在污水浇灌时 Vc 含量略有降低.对于玉米中脂肪含量,三级回用水与清水浇灌基本相同(4.8%左右),二级水和污水浇灌时脂肪含量略有降低(4.25%左右).三级水和二级水浇灌对作物中蛋白质、总糖和淀粉含量无显著影响,但是污水浇灌使作物中蛋白质、总糖和淀粉含量有所升高,这主要是由于污水的污染物中含有蛋白质、碳水化合物类物质^[12]以及大量 N、P 等营养成分,为作物生长提供了养分.

表 2 受试作物在经不同水质浇灌后主要营养成分含量

Table 2 Principal nutrient contents in the crops irrigated with different water

作物品种	营养指标	清水	三级水	二级水	污水
黄瓜	Vc/mg·kg ⁻¹	125.0	123.1	123.6	121.1
	蛋白质/%	0.737 5	0.738 9	0.736 2	0.812 5
	总糖/%	0.618 3	0.723	0.902 7	0.956 3
白菜	Vc/mg·kg ⁻¹	444.5	456.3	410.2	421.4
	蛋白质/%	0.134 8	0.142 1	0.154 3	0.164 5
	总糖/%	2.099	2.024	2.036	2.019
玉米	蛋白质/%	10.28	10.43	10.54	10.84
	淀粉/%	74.42	74.40	74.84	76.42
	脂肪/%	4.763	4.948	4.231	4.277

以上结果说明,再生水浇灌对作物品质未产生明显的不良影响,污水浇灌在一定程度上还能提高作物营养物质含量.

2.2 不同水质浇灌对作物中非金属无机物含量的影响

4 种不同的灌溉水对黄瓜、白菜和玉米中非金属无机物含量的影响如表 3 所示.据报道,人体摄入的硝酸盐 81.2% 来源于蔬菜^[13].虽然硝酸盐本身对人体无直接危害,但在某些厌氧或者兼性微生物的作用下硝酸盐能够被还原成亚硝酸盐,进而在胃酸的作用下形成亚硝胺.亚硝胺是强烈的致癌物,过量摄入将会对人类健康产生不利影响,因此本研究将作物中的硝酸盐作为 1 项重要指标进行讨论.

从表 3 可以看出,3 种作物中的硝酸盐含量与灌溉水中氮含量(表 1)基本呈现出正相关性,即随清水、三级水、二级水和污水中总氮含量的升高而升高.对于同一种灌溉水,白菜中硝酸盐含量远高于黄瓜和玉米,这是由于硝态氮是由根吸收并主要是在叶片中被还原的,因此茎和叶柄的硝态氮含量较高,而果实的硝态氮含量较低,这与王淑娥等的结论相同^[14].污水浇灌的作物中硝酸盐含量明显高于其它 3 种水,说明污水浇灌能显著增加硝酸盐在作物内的积累,污水浇灌的白菜中硝酸盐含量高达 554.4 mg/kg.沈明珠等^[15]提出了蔬菜硝酸盐卫生评价标准,该标准按每人每天平均食用 0.5 kg 蔬菜、人均体重为 60 kg 计算,按照世界卫生组织和联合国粮农组织规定的每日允许摄入量(ADI 值),推算出我国蔬菜(鲜重)的硝酸盐允许含量为 432 mg/kg.按此标准,污水浇灌的白菜中硝酸盐含量已达到污染水平.

表 3 受试作物在经不同水质浇灌后非金属无机物含量/mg•kg⁻¹

Table 3 Nonmetallic elements in the crops irrigated with different water /mg•kg⁻¹

作物品种	指标	清水	三级水	二级水	污水
黄瓜	硝酸盐	44.92	46.75	51.09	58.66
	亚硝酸盐	0.085 3	0.101 8	0.140 9	0.178 5
	总磷	194.1	170.1	211.6	212.5
	Cl ⁻	227.8	237.1	236.6	252.4
白菜	硝酸盐	286.6	311.5	404.0	554.4
	亚硝酸盐	0.965 7	1.213	1.608	2.335
	总磷	268.9	366.2	329.4	415.2
	Cl ⁻	296.1	307.6	354.9	460.9
玉米	硝酸盐	134.2	153.8	158.7	175.6
	亚硝酸盐	nd ¹⁾	nd	nd	nd
	总磷	3 261	3 406	3 485	3 379
	Cl ⁻	311.0	333.4	328.6	337.5

1) nd 表示低于检出限

由表 3 还可以看出,黄瓜和白菜中均含有一定量的亚硝酸盐,而且也按浇灌水中 N 含量升高呈逐

渐升高趋势,但均低于国家无公害蔬菜标准(4 mg/kg),属于可接受水平.另外,4 种水浇灌的作物中总磷和氯离子含量差别不大,只有污水浇灌的白菜中总磷和氯离子含量显著高于其它 3 种水,说明污水浇灌会使白菜中总磷和氯离子发生积累.

由此可见,三级水浇灌后作物中各种非金属无机物含量与清水浇灌无显著差异,二级水浇灌时硝酸盐含量较清水浇灌高,而污水浇灌时各种非金属无机物含量均明显偏高,产生显著积累,特别是硝酸盐含量已达到污染水平.因此,污水不适合作为灌溉水源.

2.3 不同水质浇灌对作物中重金属含量的影响

不同水质灌溉条件下,作物中残留的重金属含量呈现出明显不同的规律(图 1).Cd、Cr、Pb 3 种元素在作物中的含量基本按照清水、三级、二级和污水浇灌的顺序呈现升高的变化趋势,与灌溉水中金属含量变化趋势一致,说明作物中的这 3 种重金属含量与其所使用灌溉水中的金属含量基本呈现正相关性.而不同作物中的 Ni、Cu、Zn 含量在 4 种不同灌溉条件下则无明显的变化规律,当灌溉水中金属含量升高时,相应作物中的金属含量并未发生明显变化,说明作物对这 3 种元素的富集能力不是很强.

对于同一种灌溉水,同一种金属在不同作物中的含量不同,这与作物对金属的富集能力有关.通过比较图 1 中(a)和(d)可以发现,对于同一种灌溉水,白菜中 Cd 和 Ni 的含量均高于黄瓜,即白菜对 Cd 和 Ni 富集能力较黄瓜强,其主要原因是白菜属于茎叶类蔬菜,黄瓜属于果菜类蔬菜,二者吸收的重金属均来自根部.细胞壁是重金属进入细胞内的第 1 道屏障,由于细胞壁有沉淀金属的作用,因此根部细胞壁是金属离子的过滤层和贮存场所.当重金属与细胞壁的结合位点已达饱和,多余的金属离子不再被束缚于细胞壁,而是释放入细胞质,参与细胞内的代谢活动,所以大部分重金属离子由根迁移到茎叶,这样能够到达果实的金属离子就相对减少^[16].由于玉米测定时采用的是干样,而且灌溉期较黄瓜和白菜长,故其大部分金属含量较前两者高,但 Cr 含量则相反,这说明玉米对 Cr 富集能力不强.

总体来看,与清水浇灌相比,三级水浇灌对作物中重金属残留影响不大,二级水浇灌会使重金属略有升高,污水浇灌则使农作物发生明显的重金属积累.由于试验所测样品均为作物的可食用部分,其中的金属离子通过食用可直接进入人体,含量过高能直接对人体产生不良影响,尤其是 Cd、Cr 等致癌性

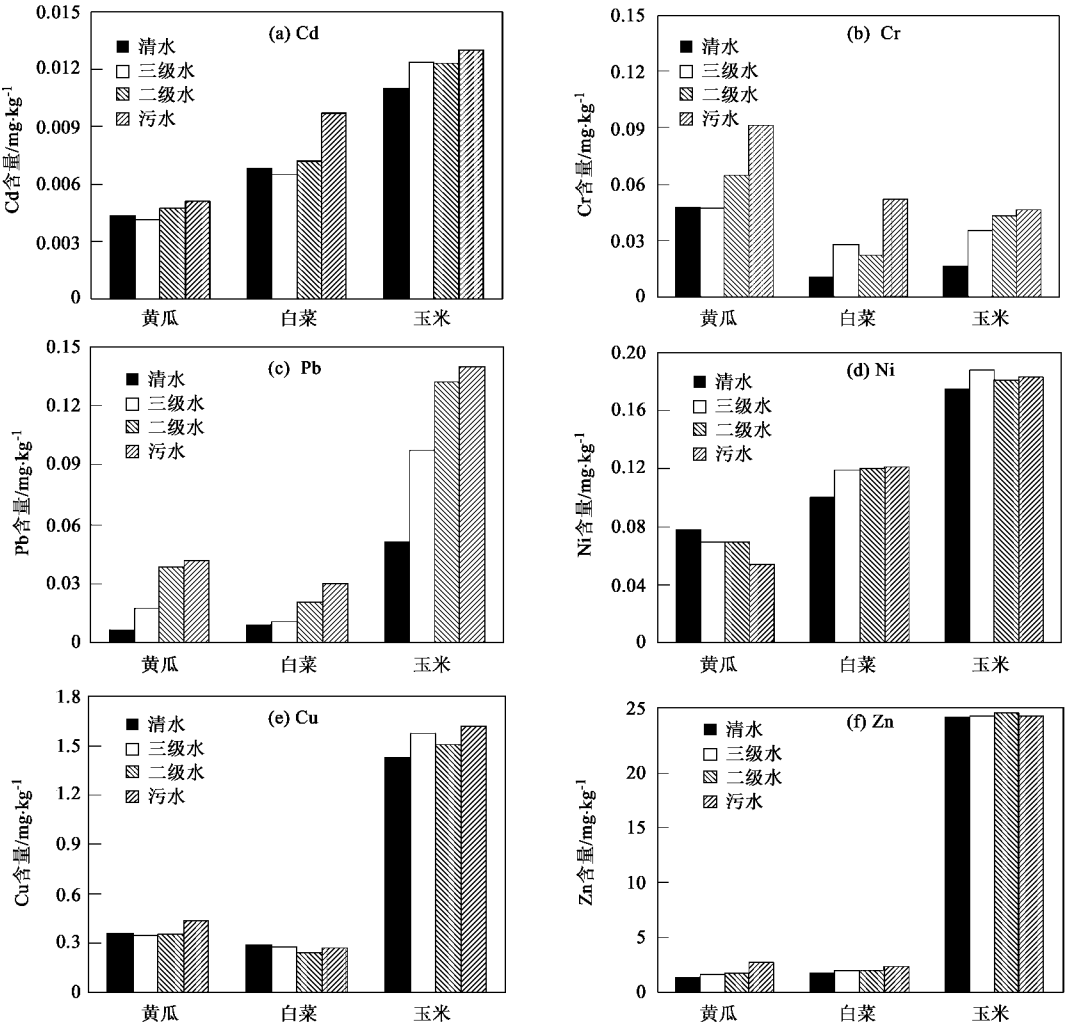


图 1 不同水质浇灌条件下作物中重金属的残留

Fig.1 Residual heavy metals in the crops irrigated with different water

物质.从玉米样品测得的结果还可发现,重金属在种子中也会发生积累,常年灌溉会加重植株中重金属的积累和富集,因此污水不适合直接用于农田灌溉.

2.4 不同水质浇灌对土壤质量的影响

2.4.1 土壤中的重金属残留

自然条件下,土壤中重金属含量与土壤母质和成土过程有关.本试验土壤理化性质及重金属背景含量见表 4.由于试验区土壤底质相同,灌溉区土壤污染物来源主要为灌溉水,因此重金属污染物在不同土壤中的含量变化趋势应与灌溉水中含量变化趋势相同或相近^[17].不同水质浇灌作物条件下所对应的土壤中的重金属含量见表 5.

对于黄瓜和白菜,土壤中的金属除 Cd 外均未表现出明显的残留规律,分析认为这主要是由于黄瓜和白菜的生长期较短,灌溉水量较少,而植物本身还

要吸收一部分,所以浇灌残留在土壤中的金属较少.对于玉米土壤,Cd、Cr、Pb 含量均随灌溉水中含量的增加而略有增加,这主要是由于玉米的生长期相对较长,浇水量较多,所以部分金属表现出一定的残留规律.由此推断,长时间的灌溉会使大部分金属在土壤中都表现出明显的累积.

对于 4 种灌溉水对应的土壤,Cd 均表现出明显的残留规律,即随灌溉水中金属浓度的增加而增加.对同一种灌溉水,黄瓜土壤中的 Cd 高于白菜土壤的 Cd.结合图 1 可知,虽然二者的浇灌量基本相同,但黄瓜果实中的 Cd 量低于白菜中的量.

对于污水灌溉造成的土壤重金属污染已有很多报道^[18,19],本试验土壤中重金属没有很明显的残留.笔者认为这主要是试验期较短所致.土壤对污染物的自然消解能力是有限的,特别是当土壤重金属含

量达到一定水平后,仅依靠生态系统本身的消化能力很难使土壤重金属污染物的含量降低到原有水平,多种重金属之间还会产生复合污染效应^[16],比如,Pb 的存在有可能增加 Cd 的活性或促进 Cd 向植

物的茎叶转移,促进植物对 Cd 的吸收等.因此,对于污水灌溉应严格控制.另外考虑到污水和二级水中大肠菌群含量过高也会对人体健康造成威胁^[20].所以,与污水和二级水相比,三级水更适合灌溉.

表 4 土壤理化性质及重金属背景含量/mg·kg⁻¹

Table 4 Physi-chemical characteristics of soil and background contents of heavy metals/mg·kg ⁻¹										
pH	有机质	Cd	Cr	Pb	Ni	Cu	Zn	Na	Ca	Mg
5.92	34.6	0.366	29.885	10.21	22.56	17.81	64.50	244.7	3 672	5 011

表 5 不同水质灌溉作物条件下土壤中重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 5 Heavy metal contents in soil irrigated with different water/mg·kg ⁻¹										
作物品种	灌溉水	Cd	Cr	Pb	Ni	Cu	Zn	Na	Ca	Mg
黄瓜	清水	0.275	14.54	4.688	17.34	17.49	44.12	273.1	4 095	6 926
	三级	0.281	14.76	6.625	16.18	16.07	44.93	285.1	3 795	5 359
	二级	0.300	14.83	6.869	16.22	16.88	43.20	296.9	3 808	5 697
	污水	0.331	14.63	5.575	17.19	17.66	44.56	320.8	4 469	6 346
白菜	清水	0.084	29.54	10.10	20.45	16.99	63.14	259.7	4 683	5 850
	三级	0.101	28.99	10.52	20.60	17.72	62.07	279.2	4 547	5 878
	二级	0.132	28.10	10.83	20.03	18.34	65.46	311.7	4 549	6 266
	污水	0.157	28.87	11.02	20.33	18.38	66.87	249.2	4 486	5 238
玉米	清水	0.193	19.00	9.193	21.12	17.72	63.83	245.7	4 570	5 506
	三级	0.200	20.77	9.475	21.09	17.72	64.2	294.9	4 567	5 591
	二级	0.209	23.29	9.605	20.99	17.55	65.03	302.9	4 575	5 394
	污水	0.226	25.82	9.578	21.15	17.21	66.08	250.5	4 638	5 092

2.4.2 不同水质浇灌对土壤盐碱化程度的影响

土壤盐碱化是指土壤胶粒复合体上代换性钠增多、pH 值升高、土壤发生强碱性反应和土壤物理性质恶化的现象.灌溉水质和土壤盐碱化有密切关系,特别是在干旱或半干旱地区.灌溉水中的盐分不断在土壤剖面中的根区积累,并和土壤吸收性复合体相互作用,导致土壤盐化、碱化的发生.在一定程度上,土壤碱化(钠质化)的危害更甚于盐化^[21],它往往使土壤微粒高度分散和膨胀,物理性质恶化,干时板结,湿时重胀,很难透水透气,土壤水分有效性严重降低,对作物生长十分不利,因此本试验考察了不同处理水灌溉对土壤盐碱化的影响.钠吸附比(SAR)是表征土壤盐碱化的重要指标,其计算式如下:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

(1)

式中,[Na⁺]为钠离子浓度(mg/kg);[Ca²⁺]为钙离子浓度(mg/kg);[Mg²⁺]为镁离子浓度(mg/kg).

将表 5 中 Na、Ca、Mg 的数据按照式(1)进行计算,可得到不同浇灌条件下各种作物土壤的 SAR 值(图 2).由图 2 可以看出,SAR 值随清水、三级水、二级水、污水灌溉的顺序依次升高.根据 Richards 等^[22]

提出的分级标准,利用计算得到的 SAR 对灌溉引起的碱化程度进行评价,4 种水浇灌后的土壤均属 S1 级(SAR < 10),即碱化危害程度较低.

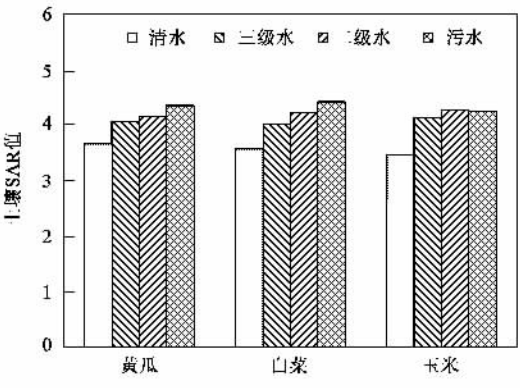


图 2 不同水质浇灌作物条件下土壤的 SAR 值
Fig.2 SAR values of the soil corresponding to the crops irrigated with different water

3 结论

(1)与清水灌溉相比,二级水、三级水灌溉对作物的品质无显著影响,而污水灌溉在一定程度上能提高作物品质.以蛋白质为例,采用 4 种水浇灌时,3 种作物中蛋白质含量范围分别为:黄瓜 0.736 2 ~

0.812 5 mg/kg, 白菜 0.134 8 ~ 0.164 5 mg/kg, 玉米 10.28 ~ 10.84 mg/kg. 三级水灌溉对作物硝酸盐含量影响不大, 二级水和污水灌溉均显著提高硝酸盐含量, 污水灌溉时白菜中硝酸盐含量高达 554.4 mg/kg, 已达到污染水平, 不适宜浇灌作物。

(2) 三级水和二级水灌溉对作物中重金属含量影响不大, 而污水灌溉则使作物中重金属发生积累, 因此不适于灌溉。由于本试验只做了 1 季种植期的灌溉, 故土壤中重金属没有明显积累。由于试验期较短, 本研究得到的结论只具有初步参考价值, 有关回用水长期灌溉农田的安全性问题还需要深入地研究。

参考文献:

- [1] Simon T. Reuse of effluent water-Benefits and risks[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **80**(1~3): 147 ~ 159.
- [2] Liu W H, Zhao J Z, Ouyang Z Y, *et al.* Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China[J]. *Environment International*, 2005, **31**: 805 ~ 812.
- [3] 张超品. 再生水灌溉利用研究[J]. *北京水利*, 2004, **4**: 17 ~ 19.
- [4] Anderson A D, Heryford A G, Sarisky J P, *et al.* A waterborne outbreak of Norwalk-like virus among snowmobilers-Wyominw, 2001[J]. *Journal of Infectious Diseases*, 2003, **187**: 303 ~ 306.
- [5] Singh K P, Mohan D, Sinha S, *et al.* Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area[J]. *Chemosphere*, 2004, **55**: 227 ~ 255.
- [6] Mapanda E N, Mangwayana J, Nyamangaraa K E, *et al.* The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, **107**: 151 ~ 165.
- [7] 金兆丰, 徐竟成. 城市污水回用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 502 ~ 509.
- [8] Muchuweti M, Birkett J W, Chinyanga E, *et al.* Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, **112**(1): 41 ~ 48.
- [9] Caussy D, Gochfeld M, Gurzau E, *et al.* Lessons from case studies of metals: investigating exposure, bioavailability, and risk[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, **56**: 45 ~ 51.
- [10] Angelakis A N, Bontoux L. Wastewater reclamation and reuse in Bureau countries[J]. *Water Policy*, 2001, **3**: 47 ~ 59.
- [11] Lubelloa C, Gori R, Nicese F P, *et al.* Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation[J]. *Water Research*, 2004, **38**: 2939 ~ 2947.
- [12] 曾德付, 朱维斌. 我国污水灌溉存在问题和对策探讨[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, **22**(4): 221 ~ 224.
- [13] Dich J, Jarvinen R, Knekt P, *et al.* Dietary intakes of nitrate, nitrite and NDMA in the Finnish mobile clinic health examination survey[J]. *Food Addit. Contam.*, 1996, **13**: 541 ~ 552.
- [14] 王淑娥, 冷家峰, 刘仙娜. 济南市蔬菜中硝酸盐及重金属污染[J]. *环境与健康杂志*, 2004, **21**(5): 312 ~ 313.
- [15] 沈明珠, 翟宝杰, 东惠茹, 等. 蔬菜硝酸盐累积的研究[J]. *园艺学报*, 1982, **9**(4): 41 ~ 47.
- [16] 许桂莲, 王焕校, 吴玉树, 等. Zn、Cd 及其复合对小麦幼苗吸收 Ca、Fe、Mn 的影响[J]. *应用生态学报*, 2001, **4**(12): 275 ~ 278.
- [17] 段飞舟, 何江, 高吉喜, 等. 城市污水灌溉对农田土壤环境影响的调查分析[J]. *华中科技大学学报*, 2005, **22**: 181 ~ 184.
- [18] Alam M G, Snow E T, Tanaka A. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, **308**: 83 ~ 96.
- [19] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, *et al.* Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, **109**(3~4): 310 ~ 322.
- [20] Shuval H, Lampert Y, Fattal B. Development of a risk assessment approach for evaluating wastewater reuse standards for agriculture[J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(11~12): 15 ~ 20.
- [21] Herrero J, Coveta O P. Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district[J]. *Geoderma*, 2005, **125**: 287 ~ 308.
- [22] Richards L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils[M]. USDA agricultural handbook No. 60, Washington DC: US department of agriculture, 1954. 160.