

# 再生水灌溉对土壤和葡萄品质的影响

张文莉, 李 阳, 王文全\*

(新疆农业大学草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**2011—2013年,经过3年小区实验,分析了再生水灌溉对土壤和葡萄品质的影响。实验结果表明,再生水区的土壤总氮、总磷和有机质的含量呈现低于清水对照区的趋势,而硝态氮与碱解氮含量却高于清水对照区。再生水灌溉区土壤Cd含量高于清水对照区,而Pb、Cu的含量均低于清水对照区。土壤中重金属有一定的积累现象,但均未超出《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》中的重金属限量值,说明短期再生水灌溉未造成土壤重金属污染。再生水灌溉在一定程度上能提高葡萄的产量,但对葡萄的品质未产生有利的影响。3年实验中,再生水灌溉区葡萄的重金属含量低于清水灌溉区,说明短期再生水灌溉对葡萄重金属含量的影响不大。研究表明再生水可以用作灌溉用水,但再生水中重金属对环境的影响是长期的、积累的、复杂的,要确保再生水灌溉的安全还需进一步研究。

**关键词:**再生水;重金属;土壤;葡萄品质

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)02-0149-08 doi: 10.13254/j.jare.2015.0243

引用格式:

张文莉, 李 阳, 王文全. 再生水灌溉对土壤和葡萄品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 149-156.

ZHANG Wen-li, LI Yang, WANG Wen-quan. Effects of Reclaimed Water Irrigation on Soil and Quality of Grape[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 149-156.

## Effects of Reclaimed Water Irrigation on Soil and Quality of Grape

ZHANG Wen-li, LI Yang, WANG Wen-quan\*

(College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumchi 830052, China)

**Abstract:**The study analyzed the effects of reclaimed water irrigation on soil and quality of grape through three years of experiment from 2011 to 2013. The experimental results showed that the contents of total nitrogen, total phosphorus and organic matter in reclaimed water area were lower than that in the control area, while the contents of nitrate nitrogen and available nitrogen were higher than in the control area. The content of soil Cd in reclaimed water irrigation district was higher than that in the control area, but the contents of Cu and Pb were lower than that of the control area. The heavy metals in soil had a certain accumulation phenomenon, but they did not exceed the limited value of heavy metals in Soil Environmental Quality Standard (GB 15618—1995), indicating that short-term reclaimed water irrigation did not cause heavy metal pollution in soil. Reclaimed water irrigation could increase the yield of grape in a certain extent, but the quality of the grapes was not favorable. In the three years test, the contents of heavy metals in reclaimed water irrigation district of grapes were lower than fresh water irrigation district, which showed that the short-term reclaimed water irrigation had little effect on the heavy metal content of grape. Studies have shown that reclaimed water can be used for irrigation water, but the effect of heavy metals on environment is long-term, accumulation, complex in reclaimed water. It needs to be further studied to ensure the safety of reclaimed water irrigation.

**Keywords:**reclaimed water; heavy metals; soil; grape quality

再生水是指污水经适当处理后,达到一定的水质标准,满足某种使用需求的水<sup>[1]</sup>。再生水可以作为景观

用水、娱乐用水、灌溉用水等。再生水中的氮和磷对植物作物来说是很好的营养物质,可以作为肥料,使用再生水灌溉可以减少化肥的使用量,这样可以使农民的经济效益得到相对的提高<sup>[2]</sup>。但再生水中含有各种重金属离子及有害物质,再生水灌溉对作物、土壤、地下水及环境的影响尚不清楚,使用再生水灌溉存在较大的风险和疑虑。所以,再生水用于农业灌溉是否安

收稿日期:2015-10-13

基金项目:新疆自治区高校科研计划重点资助项目(XJEDU2010126);  
新疆自治区土壤学重点学科资助项目

作者简介:张文莉(1988—),女,硕士研究生,研究方向为环境污染控制与修复。E-mail:zhangwenli11251122@126.com

\*通信作者:王文全 E-mail:wqw6804@163.com

全是迫切需要解决的问题<sup>[3-4]</sup>。

再生水对土壤质量的影响随再生水来源的变化而变化。李玉明等<sup>[5]</sup>的实验结果表明,再生水灌溉区的土壤总氮以及有机质等营养成分有所升高,并且总氮变化非常显著。King 等<sup>[6]</sup>的研究认为,再生水灌溉可以增加土壤的肥力和盐分。Mapandaa 等<sup>[7]</sup>研究发现长期(10 年)再生水灌溉条件下土壤中重金属的累积量会增加。

再生水灌溉后作物的食用安全是人们普遍关注的问题,对作物品质的影响主要集中在作物中重金属含量超标以及营养成分发生变化<sup>[8]</sup>。徐应明等<sup>[9]</sup>研究了再生水灌溉对小白菜生长发育与品质的影响,结果表明,再生水灌溉前期对小白菜生长发育有抑制作用,粗蛋白和维生素 C 含量同自来水对照之间无显著性差异,但全再生水灌溉、轮灌下可显著增加可溶性糖含量和提高小白菜产量,且对小白菜的品质无显著影响;再生水用于农业灌溉,根菜类蔬菜产量总体呈现增加趋势,硝酸盐氮与亚硝酸盐氮含量均低于标准限值<sup>[10]</sup>;李波等<sup>[11]</sup>在北京通县永乐店以番茄为材料开展了田间试验,发现再生水灌溉降低了番茄果实中的蛋白质、维生素 C 以及有机酸含量。

目前就再生水灌溉对葡萄及土壤质量影响的研究较少,且各地再生水的水质有一定差异。因此,本实验在前人研究的基础上,以地下水作为对照组,研究了再生水用于灌溉葡萄,对葡萄品质及土壤性质的影响,为再生水安全用于农业灌溉提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

本实验选用栽培于 2003 年的红提为实验用葡萄;灌溉所用再生水采自乌鲁木齐市水塔山,为乌鲁木齐虹桥污水厂的出水,经管道输送至实验地。作为对照的清水为地下水,采自水塔山。每个处理 3 个重复,每个重复 25 株。本文主要测定了再生水灌溉后葡萄的产量、可溶性糖、蛋白质、硝酸盐、维生素 C 以及葡萄和土壤中的重金属的含量。表 1 给出了每年的灌溉处理执行方案。

表 1 再生水和清水实验处理方法

Table 1 Reclaimed water and clean water test methods

| 年份     | 灌溉次数/次 | 每次灌溉量/L·株 <sup>-1</sup> | 累计灌溉量/L·株 <sup>-1</sup> |
|--------|--------|-------------------------|-------------------------|
| 2011 年 | 5      | 2                       | 10                      |
| 2012 年 | 5      | 4                       | 20                      |
| 2013 年 | 5      | 4                       | 20                      |

### 1.2 样品采集及分析

实验所使用的红提种植于乌鲁木齐市水磨沟水塔山,每年在葡萄成熟期(2011 年 8 月 20 日;2012 年 8 月 18 日;2013 年 8 月 20 日)摘取果实进行产量和品质检验。

对用于灌溉的再生水及对照所用的清水进行检测,连续 3 年,每年 2 次。检测项目及方法:pH 值、硝酸盐氮——紫外分光光度法;化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)——重铬酸钾法测定;生化需氧量(Biochemical oxygen demand, BOD)——稀释接种法;悬浮物(Suspended solids, SS)、总盐量——重量法;总氮(Total nitrogen, TN)——碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;总磷(Total phosphorus, TP)——钼酸铵分光光度法;氨氮——纳氏试剂比色法;重金属 Pb、Cu、Cd——石墨炉原子吸收法;重金属 Zn——火焰原子吸收法;重金属 As——氢化砷原子吸收法。每个样品的每个指标重复 3 次。2 种实验用水理化性质的监测结果如表 2 所示。

2011 年在再生水及清水处理前采集葡萄根际土壤本底,每年在葡萄采摘时采集各处理的葡萄根际土壤样本,用无菌自封袋收集并立即带回实验室,进行土壤基本性质检验。检测项目及方法:土壤总盐量——重量法;有机质——重铬酸钾外加热法;pH 值、硝酸盐氮——紫外分光光度法;碱解氮——扩散法;TP 和 TN——H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮法;重金属 Pb、Cd、Zn、As、Cu——原子吸收法等。

每年对葡萄果实进行品质检验。检测项目及方法:小区产量、粒重、穗重——称重法;可溶性固形物——手持糖量计法;可溶性总糖——蒽酮法;可滴定酸——NaOH 滴定法;维生素 C——比色法。

## 2 结果与分析

### 2.1 再生水灌溉对土壤的影响

对所测实验数据进行分析处理,并绘制出了再生水灌溉对土壤影响的曲线图,如图 1 所示。

由图 1(a)和图 1(b)可知,相对于清水对照区,再生水灌溉区土壤的 pH 略偏碱性;土壤中总盐含量的变化与清水灌溉区中总盐含量变化基本一致(表 2)。2011—2013 年土壤 pH 值有所下降,但土壤中总盐含量呈上升趋势,说明再生水灌溉使土壤中盐分增加。

由图 1(c)及图 1(d)可知,本底、2011 年与 2013 年,再生水区的土壤总氮均低于清水对照区,2011—2013 年,再生水区的总磷含量低于清水对照区。

表2 再生水和清水理化性质(mg·L<sup>-1</sup>)Table 2 The quality of reclaimed water and clean water(mg·L<sup>-1</sup>)

| 水质指标              | 2011年  |       | 2012年   |        | 2013年  |        | 农田灌溉水质标准<br>(GB 5084—2005) |
|-------------------|--------|-------|---------|--------|--------|--------|----------------------------|
|                   | 清水(CK) | 再生水   | 清水(CK)  | 再生水    | 清水(CK) | 再生水    |                            |
| pH                | 7.55   | 7.43  | 7.36    | 7.48   | 7.9    | 7.7    | 5.5~8.5                    |
| BOD <sub>5</sub>  | 36     | 86    | 20      | 35     | nd     | 48     | ≤40                        |
| COD <sub>Cr</sub> | nd     | 127.7 | nd      | 111.44 | 47.67  | 138.41 | ≤100                       |
| SS                | 40     | 54    | 112     | 140    | 50     | 84     | ≤60                        |
| 总盐                | 1 300  | 1 170 | 1 368   | 1 560  | 1 534  | 1 694  | ≤2 000                     |
| TN                | 7.72   | 22.12 | 8.74    | 18.31  | 15.13  | 24.36  | ≤30                        |
| TP                | nd     | 0.975 | 0.006   | 2.733  | 0.106  | 1.785  | -                          |
| 氨氮                | 0.381  | 5.403 | 0.144   | 12.34  | 0.486  | 27.497 | -                          |
| 硝酸盐氮              | 9.643  | 9.176 | 1.242   | nd     | 14.193 | 0.610  | -                          |
| Cd                | 0.005  | 0.004 | 0.001   | 0.001  | 0.001  | 0.002  | ≤0.01                      |
| Pb                | 0.027  | 0.018 | 0.007   | 0.006  | 0.002  | 0.008  | ≤0.2                       |
| Zn                | 0.28   | 0.39  | 0.002   | 0.007  | 0.005  | 0.017  | ≤2.0                       |
| Cu                | 0.01   | 0.02  | nd      | nd     | 0.01   | 0.01   | ≤1.0                       |
| As                | nd     | 0.015 | 0.000 4 | nd     | 0.006  | nd     | ≤0.1                       |

注:“nd”为未检出;“-”为尚无标准。下同。

2011—2013年再生水区土壤中的总氮、总磷含量没有显著积累,说明短期再生水灌溉不会造成土壤营养化。再生水区的土壤中硝态氮与碱解氮含量却高于清水对照区,3年中再生水土壤中硝态氮含量呈先上升后下降趋势,而碱解氮的含量有下降趋势(图1(e)、图1(f))。如图1(g)所示,2011年再生水灌溉区的土壤有机质含量与清水对照区基本一致,而其余2年均低于清水对照区。3年中土壤有机质的含量呈现逐渐降低的趋势。

## 2.2 再生水灌溉对土壤中重金属含量的影响

根据所测实验数据绘制出了再生水灌溉对土壤中重金属影响的曲线变化图,如图2所示。

如图2(a)所示,再生水区的土壤Cd含量高于清水对照区,土壤本底、2011年和2013年再生水区土壤Cd含量均超标;两处理区土壤Pb含量基本一致(图2(b)),远远低于《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》中Pb的限量标准。3年中,土壤重金属Cd、Pb含量无积累现象。

如图2(c)所示,本底与2011年再生水区的土壤Zn含量均小于清水对照区的土壤;2012年与2013年再生水区土壤Zn高于清水区,2012年清水对照区与再生水灌溉区的土壤Zn含量均为最低,参照表2可知,2012年实验用清水与再生水中的Zn含量也为最小。2011—2013年土壤中Zn的含量无积累现象。

如图2(d)所示,本底、2011年与2013年再生水区土壤Cu含量均小于清水对照区的土壤。2012年,

再生水区土壤的Cu含量略高于清水对照。2011—2012年土壤Cu含量无明显变化,2013年土壤Cu含量有一定增加。

如图2(e)所示,3年实验,清水对照区的土壤As含量均高于再生水灌溉区,参照《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》,清水对照区与再生水灌溉区的土壤中As含量未超标,但3年实验显示它在土壤中有累积的趋势。

## 2.3 再生水灌溉对葡萄产量的影响

再生水灌溉对葡萄产量的影响结果如表3所示。结果表明,与清水相比,3年实验,再生水灌溉区的葡萄粒重、穗重与小区产量均高于清水对照组。这主要原因是再生水中含有大量的氮、磷、钾及其他营养物质,为葡萄的生长提供了养分。再生水灌溉区的葡萄长势及产量均高于清水灌溉区,说明再生水可能持续不断地为葡萄提供低剂量的氮肥及磷肥,虽然土壤中总氮的含量无明显变化,但交换性硝酸盐含量的增加,促进葡萄对氮的有效吸收<sup>[12]</sup>。对照表2可知,3年实验中,再生水中的总氮、总磷含量均高于清水;2012年的再生水中总磷含量远大于清水。葡萄的生长对氮、磷、钾的需求较大,氮元素可使葡萄植株的枝叶茂盛,在花期至幼果膨大期,葡萄对氮素的需求量较大;而葡萄对磷元素的需求量在新梢旺盛生长期及果实膨大期达到高峰<sup>[13]</sup>。综合分析表明,经过3年的再生水浇灌对葡萄产量未产生明显的不良影响,在一定程度上还能提高葡萄产量。

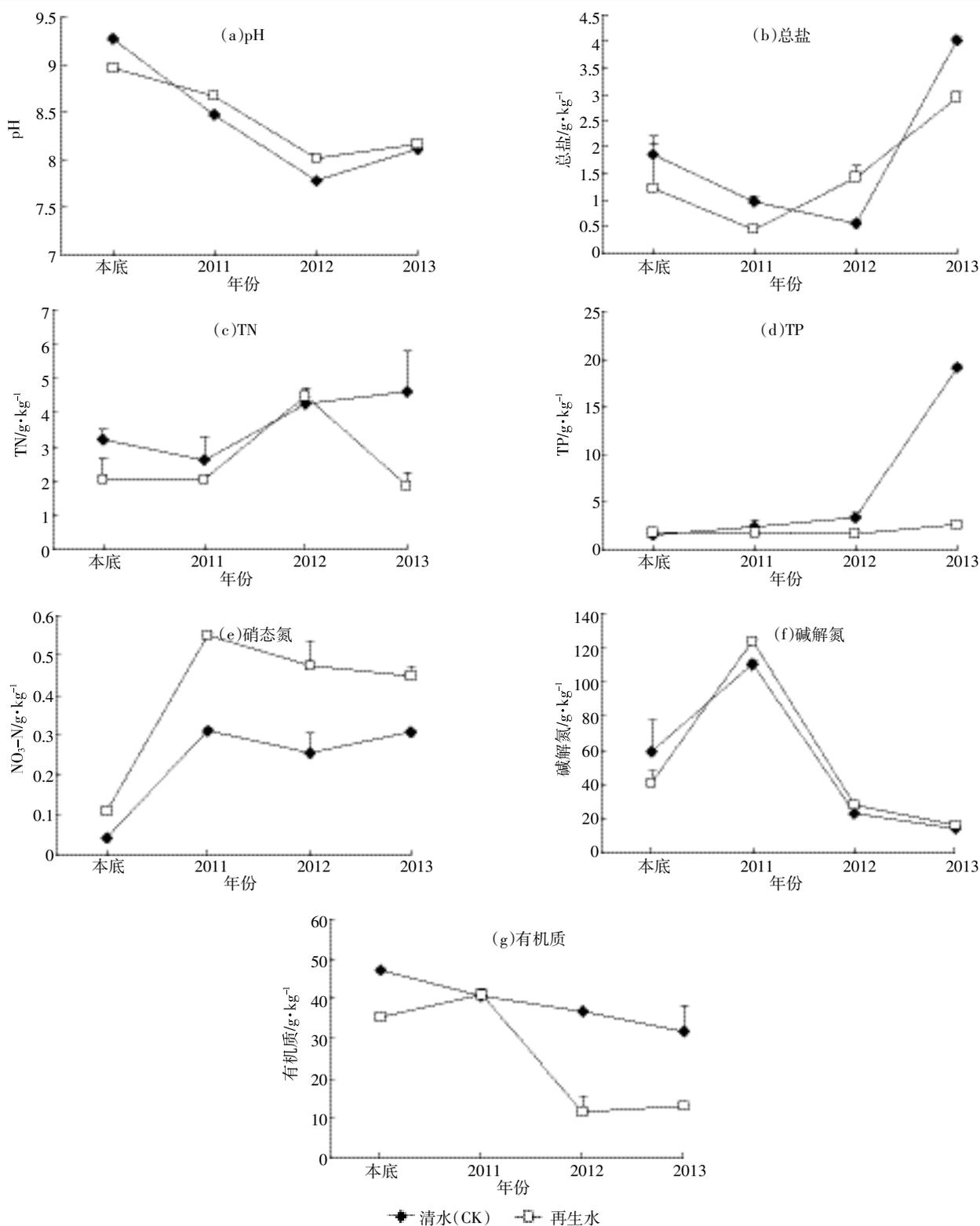


图1 再生水灌溉对土壤性质的影响

Figure 1 Effect of reclaimed water irrigation on soil physical and chemical properties

#### 2.4 再生水灌溉对葡萄品质的影响

再生水灌溉对葡萄品质的影响结果如表4所示, 3年实验,再生水灌溉区的葡萄可溶性糖含量均低于

清水对照区。这可能是由于再生水灌溉区的葡萄长势与产量均优于清水对照区,葡萄将较多的糖分作为碳源用于果实生长,造成可溶性糖含量降低( $P < 0.05$ )。

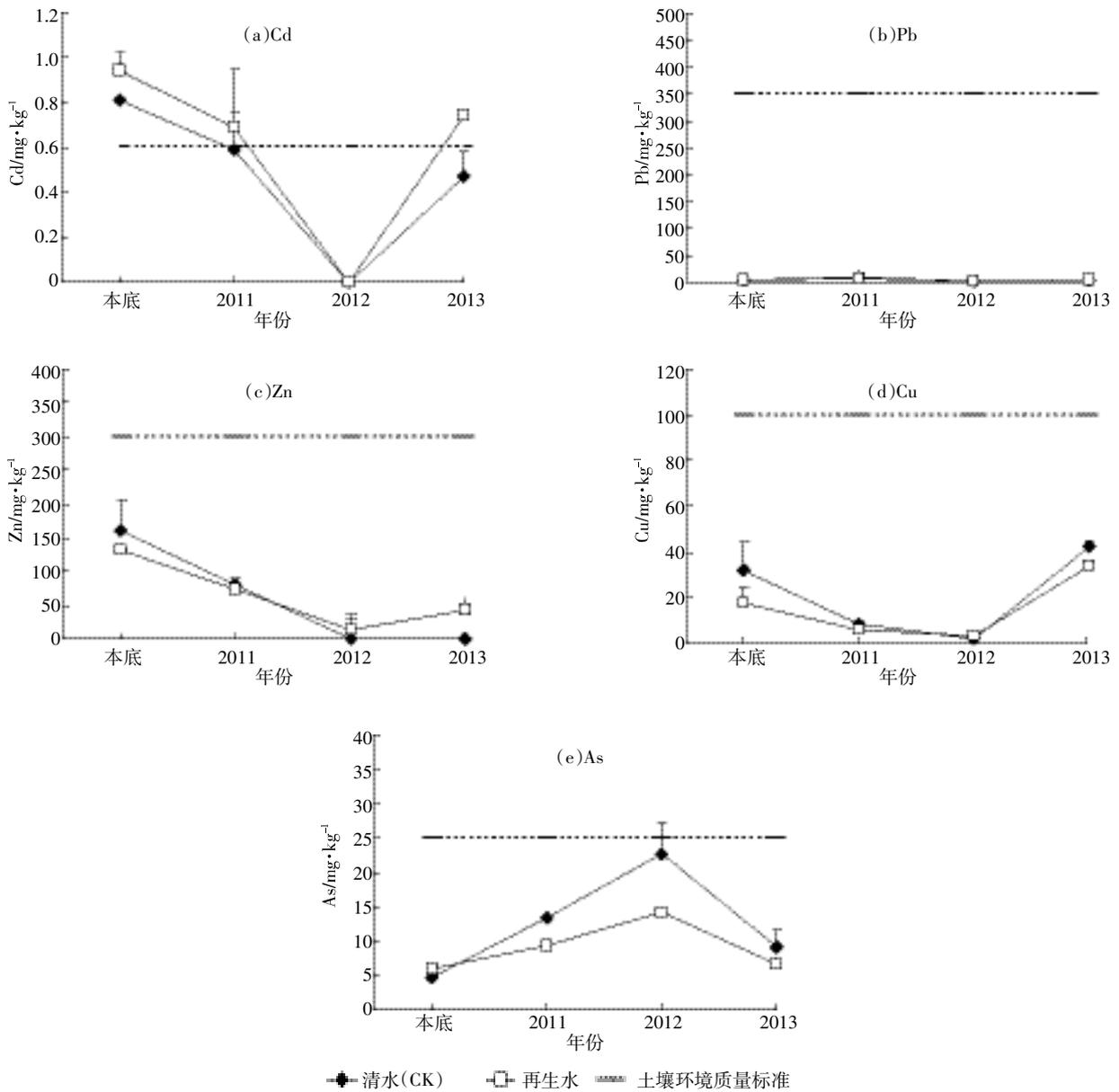


图2 再生水灌溉对土壤中重金属的影响

Figure 2 Effect of reclaimed water irrigation on heavy metals in soil

表3 再生水灌溉对葡萄的长势与产量的影响

Table 3 Effect of reclaimed water irrigation on growth and yield of grape

| 年份    | 葡萄样品 | 粒重/g       | 穗重/kg      | 小区产量/kg     |
|-------|------|------------|------------|-------------|
| 2011年 | 清水   | 6.20±0.98a | 0.80±0.33a | 25.98±2.13a |
|       | 再生水  | 6.31±1.32a | 0.93±0.30a | 26.50±2.51a |
| 2012年 | 清水   | 5.63±1.23b | 0.73±0.26a | 45.53±4.63b |
|       | 再生水  | 7.00±1.15a | 0.92±0.30a | 55.34±3.61a |
| 2013年 | 清水   | 5.20±0.89b | 0.62±0.24a | 33.17±3.87a |
|       | 再生水  | 6.20±1.02a | 0.80±0.21a | 35.48±3.70a |

注:同年份同列不同字母表示具有显著性差异(P<0.05)。下同。

再生水灌溉区的葡萄果实蛋白质含量均显著低于清水对照区,由表2和图2(c)可知,2013年灌溉用再生水与再生水灌溉区的土壤中Zn含量都高于清水对照,Zn有助于植物体内蛋白质的提高,这与贺晓等<sup>[14]</sup>的研究相一致。再生水灌溉区的葡萄可滴定酸含量均小于清水对照,2013年具有显著差异(P<0.05)。这也是由于再生水灌溉区的葡萄长势较好,需要消耗糖、酸等有机物来获得葡萄生长的能量<sup>[15]</sup>。

再生水灌溉区的葡萄硝酸盐含量均低于清水对照区,2011年与2013年有显著性差异(P<0.05)。葡萄是一种易于硝酸盐累积的果树,施用硝态氮肥会加

表 4 再生水灌溉对葡萄品质的影响  
Table 4 Effect of reclaimed water irrigation on grape quality

| 年份     | 葡萄样品 | 蛋白质/% | 维生素 C/mg·g <sup>-1</sup> | 可溶性固形物/% | 可溶性糖/% | 硝酸盐/mg·g <sup>-1</sup> | 可滴定酸/% |
|--------|------|-------|--------------------------|----------|--------|------------------------|--------|
| 2011 年 | 清水   | 0.34a | 0.41a                    | 15.61a   | 6.65a  | 1.31a                  | 0.21a  |
|        | 再生水  | 0.27b | 0.37b                    | 13.53b   | 5.34b  | 0.97b                  | 0.20a  |
| 2012 年 | 清水   | 0.19a | 0.27a                    | 14.60a   | 8.18a  | 1.33a                  | 0.25a  |
|        | 再生水  | 0.11b | 0.16b                    | 11.50b   | 6.76b  | 1.31a                  | 0.22a  |
| 2013 年 | 清水   | 0.34b | 0.34a                    | 12.94a   | 12.44a | 0.81a                  | 0.54a  |
|        | 再生水  | 0.47a | 0.36a                    | 11.89b   | 12.29a | 0.68b                  | 0.31b  |

强果实硝酸盐含量的累积,但本实验灌溉所用清水中含有的硝态氮,远高于再生水中硝态氮的含量(表 4)。《食品中污染物限量(GB 2762—2012)》中并未对水果中硝酸盐含量进行明确的限定。

再生水灌溉区的葡萄果实可溶性固形物含量均显著低于清水对照区( $P<0.05$ )。2011 年与 2012 年再生水灌溉区的葡萄维生素 C 含量显著低于清水对照区( $P<0.05$ )。

可溶性糖是植物体内的一种碳源,可调节植物生长、发育、抗性形成等多个生理过程<sup>[6]</sup>。再生水灌溉区的葡萄果实虽大但可溶性糖含量却较低,可能是由于将较多的糖分作为碳源用于果实的生长。由表 4 可知,再生水灌溉并未对葡萄的品质产生有利的影响。再生水区的葡萄可溶性糖、可滴定酸、可溶性固形物均低于清水对照区。

### 2.5 再生水灌溉对葡萄重金属含量的影响

表 5 为再生水浇灌对葡萄重金属含量的影响结果。3 年实验,再生水浇灌区与清水对照区的葡萄果实中均未检出 Cd;2012 年,再生水区的葡萄中 Zn 高于清水对照;2013 年清水区的葡萄果实 Pb、Cu 及 As 含量均高于再生水处理组。

以上结果表明,再生水浇灌葡萄果实中重金属含量大多低于清水对照区,只有 2012 年再生水浇灌区

Zn 含量高于清水对照区,参照《食品中污染物限量(GB 2762—2012)》,葡萄果实中重金属含量均未超过水果的污染物限量值。

### 2.6 灌溉水中营养元素、重金属与果实长势和品质的相关性分析

从表 6 中可以看出,葡萄粒重、穗重、小区产量受总磷的影响较大,穗重、粒重与 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub> 含量产生显著正相关,小区产量与灌溉水中 K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>含量极显著正相关。可见对葡萄长势与产量影响较大的是水中的总磷与钾、钠含量。营养元素与果实品质多数呈现显著负相关关系。氮、磷、K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>以及 COD<sub>Cr</sub> 与果实的可溶性固形物含量成极显著负相关关系;K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>对果实的维生素 C 含量产生显著负相关影响。

## 3 讨论

### 3.1 再生水灌溉对土壤的影响

再生水用于农田灌溉虽然可以解决城市污水排放和农业用水的问题,但是长期用污水灌溉对土壤质量会有不同程度的影响。首先,用于灌溉的再生水中可能含有大量的无机物质和有机物质,特别是含氮有机物质,既可能成为农田灌溉的肥水资源,改善土壤肥力水平,也可能因为灌溉水中硝态氮在作物体内过量积累,影响人体健康;其次,灌溉所用再生水中氮、

表 5 再生水灌溉对葡萄果实重金属含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 5 Effect of reclaimed water irrigation on the contents of heavy metals in grape fruits(mg·kg<sup>-1</sup>)

| 年份                     | 葡萄样品      | Cd   | Pb    | Zn    | Cu    | As    |
|------------------------|-----------|------|-------|-------|-------|-------|
| 2011 年                 | 清水        | nd   | nd    | nd    | 0.769 | 0.087 |
|                        | 再生水       | nd   | nd    | nd    | 0.092 | 0.038 |
| 2012 年                 | 清水        | nd   | 0.005 | 0.133 | 0.336 | nd    |
|                        | 再生水       | nd   | 0.005 | 0.860 | 0.194 | nd    |
| 2013 年                 | 清水        | nd   | 0.014 | nd    | 0.355 | 0.051 |
|                        | 再生水       | nd   | 0.001 | nd    | 0.186 | 0.005 |
| 食品中污染物限量(GB 2762—2012) | 浆果和其他小粒水果 | -    | 0.2   | -     | -     | -     |
|                        | 新鲜水果      | 0.05 | 0.1   | -     | -     | -     |

表6 灌溉水中指标与葡萄果实产量及品质的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between the yield, quality of grape and the quality of irrigation water

| 指标     | BOD <sub>5</sub> | COD <sub>cr</sub> | K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup> | 总氮         | 总磷         | 氨氮        |
|--------|------------------|-------------------|---------------------------------|------------|------------|-----------|
| 粒重     | 0.708 6*         | 0.682 1*          | 0.137 8                         | 0.210 2    | 0.764 3*   | 0.423 6   |
| 穗重     | 0.793 7*         | 0.596 2*          | 0.117 9                         | 0.072 8    | 0.560 1*   | 0.267 4   |
| 小区产量   | 0.087 2          | 0.292 2           | 0.804 0**                       | 0.375 4    | 0.639 5*   | 0.243 9   |
| 可溶性糖   | -0.265 0         | 0.100 5           | 0.531 5                         | 0.597 3*   | 0.017 3    | 0.424 5   |
| 蛋白质    | 0.081 2          | 0.117 9           | -0.168 5                        | 0.263 4    | -0.219 1   | 0.408 2   |
| 可滴定酸   | -0.628 6*        | -0.254 8          | 0.325 6                         | 0.311 6    | -0.222 3   | -0.053 9  |
| 硝酸盐    | -0.186 8         | -0.371 8          | -0.181 1                        | -0.651 2*  | -0.064 8   | -0.507 6* |
| 可溶性固形物 | -0.427 2         | -0.808 3**        | -0.802 0**                      | -0.933 6** | -0.841 4** | -0.714 9* |
| 维生素 C  | -0.078 7         | -0.306 6          | -0.724 3*                       | -0.320 6   | -0.642 0*  | -0.130 8  |

注：“\*”为显著相关性，“\*\*”为极显著相关性。

磷、钾等物质,长期灌溉可能提高土壤营养物质的含量,也可能因再生水给土壤带来大量氮、磷、钾等营养元素,造成土壤富营养化;再次,再生水中含有多种重金属,可能导致土壤受到重金属等污染物威胁<sup>[17]</sup>。本实验研究表明,再生水用于短期灌溉是安全的,若想长期用作灌溉用水,其安全性问题还需进一步研究。

### 3.2 再生水灌溉对葡萄长势与品质的影响

经再生水灌溉的葡萄粒大而饱满、穗重与小区产量均比清水对照区高。因为再生水中含有较高的营养元素氮、磷等,对植株生长有较好的促进作用。

再生水区的葡萄可溶性糖、可滴定酸、维生素 C 均低于清水对照区,可溶性固形物也低于清水对照区,可见再生水灌溉并未对葡萄的品质产生有利的影响。可能是由于将较多的糖、酸等有机物作为能量用于果实的生长。

葡萄作为一种易于累积硝酸盐的果树,施用硝态氮肥会加强果实硝酸盐含量的累积,但本试验灌溉所用清水中含有大量硝态氮,远高于再生水中硝态氮的含量,造成清水对照区的葡萄果实硝酸盐含量高于再生水区。施加适量的氮、磷、钾是葡萄高产的重要因素。葡萄在花期至果实膨大期对氮素的需求量最大,葡萄对磷肥的吸收量约为氮肥的 1/3,在新梢旺盛期及果实膨大期达到高峰,葡萄对钾的吸收期较长,从萌芽一直延续到果实成熟,但钾肥过多会阻碍氮肥的吸收,使果实品质下降<sup>[18]</sup>。

## 4 结论

(1)再生水区的土壤总氮、总磷和有机质的含量呈现低于清水对照区的趋势,而硝态氮与碱解氮含量却高于清水对照区。两个区的土壤中 K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>含量均呈现逐年增加的趋势。再生水灌溉使土壤的 Cd 含量

高于清水对照区,而土壤中 Pb、Cu 的含量小于清水对照区的土壤,As 有累积,但均未超出《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》的污染物限量值。实验结果表明,再生水灌溉不会引起土壤的显著变化,用于短期农业灌溉是安全的,但再生水灌溉对土壤环境的影响是长期的、累积型的,污染物的迁移转化和累积机理也非常复杂,因此有关再生水长期灌溉农田的安全性问题还需要深入地研究。

(2)与地下水灌溉相比,再生水灌溉对葡萄的产量无显著影响,水中总磷、BOD<sub>5</sub>、K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>含量与葡萄长势正相关,可提高葡萄产量,但不显著。

(3)再生水灌溉对葡萄品质未产生有利影响。2011年及2012年,再生水灌溉区的葡萄各品质指标均小于地下水;2013年再生水灌溉组葡萄果实中硝酸盐、可滴定酸与可溶性固形物低于对照区,而蛋白质高于地下水对照。

(4)由于本研究采用的再生水中重金属含量较低,对照《食品中污染物限量(GB 2762—2012)》,葡萄果实中重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 和 As 含量均未超过水果的污染物限量值。鉴于重金属的来源不同,重金属浓度较高的再生水是否会对葡萄果实产生较显著的影响,是否适用于葡萄的灌溉,有待进一步的研究。

### 参考文献:

[1] 陈卫,吕斯丹,张炜铃,等.再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用[J].生态学报,2014,34(1):163-172.  
CHEN Wei, LV Si-dan, ZHANG Wei-ling, et al. Ecological risk and sustainable utilization of reclaimed wastewater irrigation[J]. *Journal of Ecology*, 2014, 34(1):163-172. (in Chinese)  
[2] Paranychianakis N V, Nikolantonakis M, Spanakis Y, et al. The effect of recycled water on the nutrient status of soultanina grapevines grafted on different root stocks[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1-2):185-198.

- [3] Angelakis A N, Bontoux L. Wastewater reclamation and reuse in Eureau countries[J]. *Water Policy*, 2001(3):47-59.
- [4] Lubelloa C, Gori R, Nicese F P, et al. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation[J]. *Water Research*, 2004, 38:2939-2947.
- [5] 李玉明,程波,陈凌,等.城市再生水灌溉对农田环境的影响评价研究[J].农业环境科学学报,2007,26(增刊):697-703.  
LI Yu-ming, CHENG Bo, CHEN Ling, et al. Study on the influence of urban reclaimed water irrigation on the farmland environment[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2007, 26(Suppl):697-703. (in Chinese)
- [6] King K W, Balogh J C, Harmel R D. Feeding turf with waste-water[J]. *Golf Course Management*, 2000, 87(2):59-62.
- [7] Mapandaa F, Mangwayanaa E N, Nyamangaraa J, et al. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare[J]. *Zimbabwe Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107:151-165.
- [8] Moller A, Muller H W, Abdullah A, et al. Urban soil pollution in Damascus, Syria: Concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta[J]. *Geoderma*, 2005, 124:63-71.
- [9] 徐应明,魏益华,孙扬,等.再生水灌溉对小白菜生长发育与品质的影响研究[J].灌溉排水学报,2008,27(2):1-4.  
XU Ying-ming, WEI Yi-hua, SUN Yang, et al. Effect of irrigation on growth and development and quality of Chinese cabbage[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(2):1-4. (in Chinese)
- [10] 许翠平,吴文勇,刘洪禄.再生水灌溉对根菜类蔬菜产量及品质影响的试验研究[J].节水灌溉,2008,12:9-11.  
XU Cui-ping, WU Wen-yong, LIU Hong-lu, et al. Experimental study on the effect of reclaimed water irrigation on the yield and quality of vegetables[J]. *Water Saving Irrigation*, 2008, 12:9-11. (in Chinese)
- [11] 李波,任树梅,张旭,等.再生水灌溉对番茄品质、重金属含量以及土壤的影响研究[J].水土保持学报,2007,21(2):163-165.  
LI Bo, REN Shu-mei, ZHANG Xu, et al. Effects of reclaimed water irrigation on tomato quality, heavy metal content and soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2):163-165. (in Chinese)
- [12] 唐立军,李东升,赵晓松,等.再生水灌溉草坪对土壤主要性状的影响[J].吉林农业大学学报,2008,30(5):721-724.  
TANG Li-jun, LI Dong-sheng, ZHAO Xiao-song, et al. Effects of reclaimed water irrigation on soil properties[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(5):721-724. (in Chinese)
- [13] 马树环.葡萄需肥特点与施肥[J].果业经济,2009(2):23.  
MA Shu-huan. Grape need fertilizer characteristics and fertilization[J]. *The Fruit Economy*, 2009(2):23. (in Chinese)
- [14] 贺晓,李青丰,陆海平,等.四种微量元素对老芒麦种子发育过程中水分、糖及蛋白质代谢的影响[J].草业学报,2005,14(3):100-105.  
HE Xiao, LI Qing-feng, LU Hai-ping, et al. Effects of four kinds of trace elements on the water, sugar and protein metabolism during the development of the seed of the old mans[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3):100-105. (in Chinese)
- [15] 李宁.葡萄采后致腐菌检测及真菌源激发子诱导抗病研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2005.  
LI Ning. Grape postharvest pathogens detection and fungal elicitor induced resistance research[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [16] 吉增宝,王进鑫,李继文,等.不同季节干旱及复水对刺槐幼苗可溶性糖含量的影响[J].西北植物学报,2009,29(7):1358-1363.  
JI Zeng-bao, WANG Jin-xin, LI Ji-wen, et al. In different seasons of drought and rewatering on soluble sugar content of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(7):1358-1363. (in Chinese)
- [17] 胡海燕.污染的灌溉水对农田土壤质量的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.  
HU Hai-yan. Effects of polluted irrigation water on soil quality of farmland[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [18] 司隶政.葡萄对营养元素的要求及其施肥技术[J].湖北农业科学,1994(4):46.  
SI Li-zheng. Grapes on nutrient requirements and fertilization technology[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 1994(4):46. (in Chinese)