

# 再生水灌溉对土壤质量影响的研究进展

杨鑫<sup>1,2</sup>, 赵全勇<sup>1,2</sup>, 翟大明<sup>3</sup>, 王勇<sup>2\*</sup> (1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古呼和浩特 011517; 2. 内蒙古师范大学节水农业工程研究中心, 内蒙古呼和浩特 011517; 3. 赤峰市水利科学研究院, 内蒙古赤峰 024000)

**摘要** 再生水灌溉是解决农业用水短缺的有效方式之一。总结了目前国内外学者关于再生水灌溉对土壤质量影响的研究进展, 指出再生水灌溉使土壤微生物数量增加; 再生水灌溉土壤存在盐碱化的风险; 短期再生水灌溉对土壤重金属含量的影响较小。但目前对再生水灌溉对土壤盐分、重金属、N、P 等元素以及有机物污染的迁移规律研究较少。在今后的研究中, 应侧重于利用模型模拟再生水灌溉条件下主要污染物的迁移规律, 评估再生水灌溉对土壤环境影响的风险, 建立合理的灌溉制度, 为再生水灌溉提供可行性和安全性。

**关键词** 再生水; 灌溉; 土壤质量

**中图分类号** S273.5 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)27-0133-04

## Research Advances on Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Quality

YANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHAO Quan-yong<sup>1,2</sup>, ZHAI Da-ming<sup>3</sup>, WANG Yong<sup>2\*</sup> (1. School of Geography, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 011517; 2. Inner Mongolia Agricultural Engineering Research Center for Water Saving, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 011517; 3. Water Conservancy Science Research Institute of Chifeng City, Chifeng, Inner Mongolia 024000)

**Abstract** Reclaimed water irrigation is one of the effective measures to deal with the lack of irrigation water resources. The research progress on the impact of reclaimed water irrigation on soil quality was summarized by domestic and foreign scholars. The results showed that the soil irrigated with reclaimed water increased the amount of soil microbes, and had salinization harmfulness; the heavy metal concentration in the soil irrigated with short-term reclaimed water had little negative effect on the soil. But there was little research on the transfer and migration rule of soil salinity, heavy metal, phosphorus, nitrogen and organism in reclaimed water irrigation at present. The future research should concentrate on using model to simulate the migration of major pollutants under the condition of reclaimed water, assessing the potential risks, establishing a reasonable irrigation system, providing the feasibility and safety of reclaimed water irrigation.

**Key words** Reclaimed water; Irrigation; Soil quality

我国水资源严重缺乏, 是世界 13 个贫水国之一。人均水资源占有量少, 2014 年全国水资源总量为 27 266.9 亿 m<sup>3</sup>, 人均水资源量仅为 2 018 m<sup>3</sup>[1-2]。另外我国水资源时空分布不均, 2015 年全国水资源总量为 27 962.6 亿 m<sup>3</sup>, 南方四区水资源总量为 23 229.1 亿 m<sup>3</sup>, 占全国的 83.1%; 北方六区水资源总量 4 733.5 亿 m<sup>3</sup>, 占全国的 16.9%。我国又是一个农业大国, 农业用水比重较大, 2015 年全国总用水量 6 103.2 亿 m<sup>3</sup>, 其中农业用水占 63.1% [3]。随着经济的发展, 传统水源开发方式(开发地表水、开采地下水等)已不能满足各方面用水需求, 而在非传统水源中, 再生水灌溉是解决农业用水短缺的有效方式之一。

再生水是指生活污水、工业废水经过适当的处理, 达到一定的水质标准, 满足某种使用功能, 可以回收利用的水。再生水可以用作农业灌溉、景观用水、城市杂用、工业用水等方面。再生水用于农业灌溉一方面可以减少淡水或地下水的使用量, 有效缓解水资源短缺形势; 再生水中含有氮、磷等营养物质, 可以促进植物的生长, 减少化肥的使用量。但另一方面再生水中含有较高的全盐量以及较多的有毒有害物质(重金属、有机污染物等), 不合理的灌溉可能会使土壤中盐分以及有毒物质积累, 对作物的生长乃至人类健康产生不利影响。该研究从目前国内外再生水灌溉对土壤物理性状、化学性质以及微生物等方面的影响进行探讨。

## 1 国内外再生水灌溉现状

**1.1 国外再生水灌溉现状** 国外应用再生水灌溉已经有近 1 个世纪的历史, 美国、澳大利亚、日本、以色列等国家利用再生水灌溉时间较长, 技术也比较成熟。美国加利福尼亚州 20 世纪后期开始大量使用再生水, 到 2009 年再生水年使用量已是 1970 年的 4 倍, 达到 8.94 亿 m<sup>3</sup>, 47% 的再生水回用于城市绿地或农业灌溉[4]。截至 2012 年, 美国再生水利用量达 2.6 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/d, 其中 62% 用于农业灌溉, 其余则主要用于工业用水、城市杂用等方面。澳大利亚再生水利用始于 20 世纪 90 年代, 2012 年澳大利亚再生水回用总量为 2.50 亿 m<sup>3</sup>, 其中 41% 的再生水用于农业灌溉, 35% 用于市政回用[5]。日本早在 1955 年就开始了再生水利用[6], 据日本 2009 年国土交通省统计结果显示, 全国污水处理厂年均总处理量为 143 亿 m<sup>3</sup>, 再生水产量为 2.042 3 亿 m<sup>3</sup>, 约占总处理量的 1.43% [2]。以色列是再生水回用最具有特色的国家之一, 100% 的生活污水和 72% 的城市污水得到了回用, 处理后 46% 的污水用于农业灌溉[7]。预计到 2040 年, 以色列再生水年利用量将达 8.7 亿 m<sup>3</sup>, 70% 将用于农业灌溉。除上述国家和地区外, 世界各国越来越重视再生水的利用和推广, 如亚洲的新加坡、约旦, 非洲的突尼斯, 南美洲的巴西、智利以及欧洲的法国、意大利、荷兰。

**1.2 国内再生水灌溉现状** 我国再生水灌溉起步较晚, 大体可分为 3 个发展阶段[8]: 1957 年以前为自发灌溉时期; 1957—1972 年为迅速发展时期; 1972 年至今为积极慎重发展阶段。目前, 我国再生水灌溉面积已达 361.8 万 hm<sup>2</sup>, 占全国总农田灌溉面积的 7.3%, 并且主要分布在我国北方水资源严重短缺的黄淮海辽四大流域, 约占全国再生水灌溉面积的

**基金项目** 内蒙古科技创新引导项目; 内蒙古水利科技项目(nsk201404); 国家自然科学基金项目(51269018)。

**作者简介** 杨鑫(1992—), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 研究方向: 节水灌溉和污水资源化利用。\* 通讯作者, 研究员, 博士, 从事节水灌溉和污水资源化利用方面研究。

**收稿日期** 2017-07-26

85%<sup>[9]</sup>。北京市从2003年开始规模化使用再生水,截至2014年再生水年利用量达8.6亿 $\text{m}^3$ ,农业利用1.24亿 $\text{m}^3$ 。为扩大再生水的利用,“十三五”期间,北京市提出“把再生水用起来”的目标,规划到2020年再生水利用量将达到12亿 $\text{m}^3$ <sup>[10]</sup>。天津市再生水利用起步早于北京,2002年就建成了第1个国家污水回用试点项目。大连市1991年建立了我国第1个污水利用示范工程——春柳河污水处理厂,截至2015年底,中心城区已建成12座污水处理厂,污水处理率达95%<sup>[11]</sup>。近年来南方地区也开始重视再生水的开发和利用,截至2013年5月,深圳市再生水利用量达6.46亿 $\text{m}^3$ ,成为城市“第二水源”。此外,昆明、南京、无锡等地也建成了一定规模的再生水设施。

## 2 再生水灌溉对土壤物理性状的影响

再生水灌溉对土壤质量物理性状影响的指标包括土壤质地及粒径分布、土壤容重和紧实度、孔隙度及孔隙分布、土壤结构、土壤含水量、土壤持水性等多个方面,现从以下几个方面对土壤的物理性状进行分析。

### 2.1 再生水灌溉对土壤孔隙度的影响

孔隙度反映土壤孔隙状况和松紧程度,与土壤的透水性、透气性、导热性和紧实度有关,是土壤最重要的物理性质。有学者认为再生水灌溉土壤可以增加土壤孔隙度。郑汐等<sup>[12]</sup>研究表明,与清水灌溉相比,中水灌溉下的土壤孔隙度有增加趋势。Sekaran<sup>[13]</sup>研究表明,再生水灌溉能增加土壤有机质,降低土壤容重,增加土壤孔隙度。但也有学者认为再生水灌溉会降低土壤孔隙度。孙吉雄等<sup>[14]</sup>通过对自来水和再生水灌溉草坪进行对比研究发现,再生水中的一些悬浮物会堵塞土壤气孔,降低土壤孔隙度。李晓娜等<sup>[15]</sup>研究认为,再生水中 $\text{Na}^+$ 含量较高,灌溉后会增加土粒分散程度,从而会增加土壤容重,土壤毛管孔隙度有所降低。Lado等<sup>[16]</sup>的研究表明,由于再生水中含有悬浮固体,采用再生水灌溉会堵塞土壤孔隙。

上述研究结果并不相同,主要是由于再生水灌溉对孔隙度的影响与再生水水质、土壤类型等因素有关。此外,以上学者的研究还表明,土壤孔隙度的变化与土壤容重呈正相关性,说明再生水灌溉对土壤容重也有影响,但关于这方面的研究较少。

### 2.2 再生水灌溉对土壤结构的影响

土壤结构是指土壤中的土粒相互团聚形成大小、形状各不相同的团聚体。国内外学者关于再生水灌溉对土壤结构的影响做了很多研究,一些学者认为再生水中的悬浮固体、盐分离子等会堵塞土壤孔隙,带来固结、结皮等问题,对土壤结构产生不利影响。Bedbabis等<sup>[17]</sup>利用再生水灌溉农田4年后发现,再生水中的悬浮固体会使表层土壤结皮,透水性降低。李晓娜等<sup>[15]</sup>认为再生水中的 $\text{Na}^+$ 含量较高,灌溉后会增加土粒分散程度,从而使土壤结构发生恶化。Sou等<sup>[18]</sup>的研究表明,工业废水中的盐分会使灌区土壤结构恶化,导致土壤排水不畅。但有些学者的研究认为,再生水用于灌溉可以改善土壤结构。李玉明等<sup>[19]</sup>研究认为,再生水灌溉条件下土壤有机质、细菌总数、总氮等的升高,改善了土壤结构,有利于作物的生长。

土壤结构是土壤重要的物理性质之一,再生水灌溉条件下土壤结构的变化会改变土壤物理、化学和生物性质。目前,国内外关于再生水灌溉对土壤结构影响规律方面的研究较少,很多规律也尚不明确。

## 3 再生水灌溉对土壤化学性质的影响

土壤质量化学指标对土壤养分有效性有非常大的影响,再生水灌溉对土壤质量化学指标如有机质、全氮、全磷、pH、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{N}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等产生影响。现对以下指标进行讨论。

### 3.1 再生水灌溉对土壤肥力的影响

一般来讲,土壤肥力有2方面的含义:一是土壤中营养物质的供应能力;二是土壤保持植物生长的适宜的环境条件。有学者认为由于污水处理后含有有机质、氮、磷等元素,采用再生水灌溉会增加土壤中有有机质以及氮、磷等的含量,从而提高土壤肥力,促进植物生长。李中阳等<sup>[20]</sup>采用再生水和混灌方式种植黑麦草,结果表明再生水灌溉下土壤有机质含量显著增加,对黑麦草的生长有促进作用。韩烈保等<sup>[21]</sup>试验表明,采用不同水质灌溉绿地土壤,除全氮含量变化不明显外,水解氮、速效磷、速效钾和有机质含量均有所增加,从而提高了土壤肥力。Mañas等<sup>[22]</sup>利用再生水和自来水分别灌溉苜蓿地块,结果表明灌溉3年后,再生水灌溉地块的氮、磷含量明显高于自来水灌溉。郑汐等<sup>[12]</sup>对大田草坪进行试验,结果表明长期中水灌溉下土壤全氮、全磷、全钾与清水灌溉相比均有显著增加。但是有些学者也认为再生水灌溉对土壤肥力的影响并不显著。张洪生等<sup>[23]</sup>利用再生水和自来水分别灌溉3种草坪草、3种乔木和3种灌木,结果表明土壤全氮、全磷含量均无明显变化。焦志华等<sup>[24]</sup>利用再生水灌溉大豆,结果表明再生水灌溉可提高土壤有机质、有效磷的含量,但对土壤中的全钾含量影响不大。郭魏等<sup>[25]</sup>的研究认为,短期内合理采用再生水灌溉不会使大量氮素残留于土壤,不会明显提高土壤的供磷水平。雷琼等<sup>[26]</sup>利用城市二级污水灌溉万寿菊、五彩石竹、鸡冠花、百日早、高羊茅5种植物的试验表明,在短期内采用再生水合理灌溉不会使大量氮素残留于土壤,也不会明显提高供磷水平。

上述学者关于再生水灌溉对土壤肥力的影响研究,结果各不相同。除了再生水中的营养元素会对土壤肥力产生影响外,不同灌溉方式及灌溉时间、不同土壤类型、植物种类等因素均会对土壤肥力产生影响。在今后的研究中应考虑引起土壤肥力指标变化的综合因素,考虑多变量因素对土壤肥力的影响。

### 3.2 再生水灌溉对土壤pH的影响

土壤pH即土壤酸碱度,对土壤肥力及植物生长具有重要影响。国内外学者对再生水灌溉引起土壤pH变化做了大量研究,有些学者认为,由于土壤本身具有缓冲能力,采用再生水灌溉对土壤pH的影响并不明显。王志超等<sup>[27]</sup>研究认为,由于土壤的缓冲能力,短期再生水灌溉对不同深度土层和同层土壤的pH影响均不明显。Chen等<sup>[28]</sup>研究表明,再生水灌溉条件下土壤pH变化不显著。但有些学者研究认为,由于研究区土壤不同,再生

水灌溉可以引起土壤 pH 的降低。孟建林等<sup>[29]</sup>研究表明,再生水灌溉土壤 pH 呈降低趋势,主要原因是试验土壤为碱性红壤土(pH = 8.2)。夏江宝等<sup>[30]</sup>采用室内土柱模拟试验,在不同灌溉方式下土壤 pH 均呈下降趋势,清水灌溉、清废轮灌、再生水灌溉分别下降 4.9%、4.4%、1.3%,主要是由于灌溉水的 pH 均小于当地土壤环境的本底值(pH = 8.95),灌溉有一定的稀释作用。另外,再生水灌溉时间长短也会引起土壤 pH 发生变化。Stewart 等<sup>[31]</sup>研究表明,由于再生水 pH 较高,在采用再生水灌溉 4 年后土壤 pH 升高。

由于灌溉时间长短、灌水量、研究区域土壤性质等不同,上述学者在再生水灌溉对土壤 pH 影响方面的结果并不相同,甚至出现相反的结果。目前,国内外对再生水灌溉对土壤 pH 影响的原因并不清楚,还不能解释造成 pH 变化的关键原因,再生水灌溉对土壤 pH 的影响还需进一步研究。

**3.3 再生水灌溉对土壤盐碱化的影响** 再生水中含有较多的盐分,特别是  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}^-$  等含量较多,长期不合理的灌溉可能会引起土壤盐分积累,产生盐碱化危害。土壤盐碱化包括盐害和碱害,盐害多以含盐量(矿化度)或电导率(EC 值)为指标,碱害以碱化度(ESP)或钠吸附比(SAR)为指标。郑伟等<sup>[32]</sup>研究表明,再生水灌溉 2 年后钠吸附比(SAR)出现增加的趋势,说明再生水连续多年灌溉后会发生次生盐碱化危害。Qian 等<sup>[33]</sup>研究表明,与用地表水灌溉的草地相比,利用再生污水灌溉的草地 EC 值和 SAR 都显著增加,分别高达 187% 和 481%。王昌俊等<sup>[34]</sup>用清水、清水再生水混合水、再生水 3 种水灌溉绿地,结果表明清水、混合水灌溉土壤含盐量较低,但再生水灌溉土壤已介于非盐化和轻度盐化之间,并且再生水灌溉土壤碱化度与清水灌溉相比已出现轻度碱化,说明再生水灌溉土壤会发生盐碱化。左海涛等<sup>[35]</sup>研究表明,利用再生水灌溉会使土壤  $\text{Na}^+$  增加,如果长期使用可能会导致次生盐碱化危害。张娟等<sup>[36]</sup>连续 3 年对再生水灌溉 7 年的 5 种园林植物进行研究,发现随着灌溉年限的增加,土壤全盐量均表现出增加的趋势。吕斯丹等<sup>[37]</sup>运用 ENVIRO - GRO 模型模拟了不同土壤性质、植被条件下土壤盐分的分布规律及累积趋势,结果表明不同情景模拟下,除了砂壤土外,壤土和黏壤土都会出现轻度盐渍化,但均不会影响植物的生长。

上述学者对再生水灌溉的研究均表明,再生水灌溉土壤存在盐碱化的潜在风险。利用再生水进行灌溉时,再生水水质、土壤类型、灌溉年限以及作物类型等不同,发生盐碱化风险的大小也就不一样。因此,应长期进行田间再生水灌溉试验,研究再生水灌溉水盐运移和累积规律,确定再生水灌溉发生盐碱化风险的大小,保障再生水灌溉的安全性,提出合理的再生水灌溉制度。

#### 4 再生水灌溉对土壤生物学指标的影响

土壤中含有大量的微生物,土壤细菌、放线菌、真菌是土壤中的三大类重要的微生物,与植物生长有着密切关系。由于微生物类群受各种环境因素的影响较大,各地区土壤类型、气候条件各不相同,以及再生水水质、灌溉时间、灌溉方

式等有所不同,所以微生物的数量、种类也不一致。大多数学者认为再生水灌溉可以提高土壤中微生物的数量。张洪生等<sup>[23]</sup>认为,与自来水灌溉相比,再生水灌溉 1 年后,草坪中的细菌、放线菌和真菌数量均呈增加趋势,尤其细菌数量增加比较明显,说明再生水灌溉有利于土壤微生物的繁衍。焦志华等<sup>[24]</sup>对大豆的研究表明,再生水灌溉增加了土壤中细菌和放线菌的数量,但对真菌的影响不大。龚雪等<sup>[38]</sup>采用室内灌溉土柱模拟试验,结果表明再生水灌溉条件下,表层 0 ~ 20 cm 土壤中细菌和放线菌数量有所增加。但一些学者认为再生水灌溉对土壤微生物数量影响不大。韩烈保等<sup>[39]</sup>对城市草坪绿地的试验表明,短期再生水灌溉下土壤细菌、真菌、放线菌总数都没有显著变化。

目前,关于再生水灌溉对土壤微生物的研究主要集中在微生物数量、种类的变化上,而对微生物种群结构的影响以及致病性病原微生物的影响研究较少,利用再生水灌溉是否对人类健康存在风险尚不清楚。

#### 5 再生水灌溉对土壤重金属含量的影响

工业废水处理后存在痕量元素锌(Zn)、镉(Cd)、铜(Cu)、汞(Hg)等,灌溉后会对作物产生影响,甚至会影响人类健康。国内外大量学者对再生水灌溉土壤重金属含量进行了试验研究,一些学者认为短期再生水灌溉不会引起土壤重金属含量的积累。巫常林等<sup>[40]</sup>对再生水灌溉 4 年的田间小区进行试验研究,结果表明再生水灌溉 1、3、4 年的土壤重金属含量均随着土层的增加而降低,并且不同再生水灌水量与清水灌溉相比,各层土壤重金属含量均无明显差异,因此短期再生水灌溉不会造成土壤环境重金属含量积累。Smith 等<sup>[41]</sup>也认为,处理后的污水灌溉 4 年和 17 年各层土壤重金属含量均随着土层深度增加而降低,重金属含量与土壤背景值差异不明显。但也有学者认为再生水灌溉会造成土壤重金属积累。杨军等<sup>[42]</sup>对北京市再生水灌区土壤、作物重金属含量的研究表明,再生水灌区土壤均出现了不同程度的重金属积累。Zhao 等<sup>[43]</sup>认为,再生水灌溉条件下一些重金属元素如 Cr、Cd、Pb 在土壤表层有一定的累积。杜娟等<sup>[44]</sup>通过土柱模拟试验发现,使用含有重金属的再生水灌溉时,As、Ca、Cu 和 Zn 在 0 ~ 10 cm 土层积累现象明显,加量分别占其总输入量的 93%、90%、92%、90%。

由于废水处理重金属含量并不高,短期灌溉重金属含量的变化不明显,另外由于利用再生水灌溉时间不长,长期的再生水灌区并不存在,因此,关于再生水灌溉重金属含量风险的研究并不透彻。目前,国内关于工业废水灌溉对土壤重金属含量影响的研究,还侧重于重金属含量在表层土壤的积累方面,今后应将模型有效利用于再生水灌溉对土壤的研究中,研究重金属在土壤中的空间迁移规律,控制再生水灌溉重金属污染风险性,为以后大规模开展再生水灌溉提供依据。

#### 6 再生水灌溉对土壤有机污染物的影响

土壤中有有机污染物来源非常广泛,包括农药施用、污水灌溉、污染物泄露等,污染物种类也非常多,常见的土壤有机污染物包括农药、多环芳烃(PAHs)、持久性有机污染物

(POPs)、多氯联苯(PCBs)等。研究表明,工业废水、生活污水经过一系列处理后得到的再生水中仍含有许多有机污染物,其中PAHs浓度较高,主要是二环芳烃(萘、二氢萘等)、三环芳烃(菲、蒽)。国内外学者对再生水灌区土壤的研究表明,表层土壤是PAHs的主要累积区域。金爱芳<sup>[45]</sup>对不同灌溉条件下多环芳烃的迁移规律研究表明,污灌区、再生水灌区、清水灌区PAHs均在地表处浓度最高,随着深度的增加而下降,并且再生水灌区PAHs总量达206.75 μg/kg,已超过临界值200 μg/kg,属于中度污染。陈素暖等<sup>[46]</sup>对不同灌区的试验表明,PAHs主要在表层土壤积累,再生水灌区多环芳烃污染已达临界值200 μg/kg,说明再生水灌溉对土壤质量安全存在一定威胁。Mahjoub等<sup>[47]</sup>认为,再生水灌区土壤PAHs会发生积累现象。何江涛等<sup>[48]</sup>试验表明,再生水灌区表层土壤PAHs总量已达206.7 μg/kg,与污染临界值相当。

目前,国内外有关再生水灌溉对土壤有机物污染的研究时间较短,对有机物污染迁移规律研究较少。应加强对引起污染物在土壤中迁移的影响因素、有机物种类等方面的研究,评估再生水灌溉的健康风险,为再生水安全灌溉提供可行性方案。

## 7 结论与展望

从以上国内外研究现状可以看出,许多学者在再生水灌溉方面已经做了大量的研究工作。再生水灌溉对土壤质量的影响因素较多,不同再生水水质、不同土壤类型、不同灌溉方式以及灌溉时间长短等条件下土壤的反应各不相同,综合考虑几个因素共同作用下再生水灌溉对土壤质量影响方面的研究较少。另外,再生水灌溉对土壤环境影响的风险评价体系的研究需进一步加强。

在今后的研究中,在再生水灌溉对土壤N、P等营养元素含量变化、盐碱化危害、病原微生物种、重金属污染以及有机污染物等方面,应侧重于利用模型模拟再生水灌溉条件下主要污染物的迁移规律,评估再生水灌溉条件下土壤发生盐碱化的风险程度,提出合理的调控手段,建立合理的灌溉制度,为再生水灌溉提供可行性和安全性。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R]. 2014.  
 [2] 郑祥,魏源送,张振兴,等. 中国水处理行业可持续发展战略研究报告(再生水卷)[M]. 北京:中国人民大学出版社,2016:110-113.  
 [3] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[R]. 2015.  
 [4] 陈卫平. 美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示[J]. 环境工程学报,2011,5(5):961-966.  
 [5] 李昆,魏源送,王健行,等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. 环境科学学报,2014,34(7):1635-1653.  
 [6] 山崎凉子,杜刚. 日本非传统水源的开发利用[J]. 中国给水排水,2009,25(8):101-103.  
 [7] 陈卫平,张炜铃,潘能,等. 再生水灌溉利用的生态风险研究进展[J]. 环境科学,2012,33(12):4070-4080.  
 [8] 杨飞,蒋丽娟. 浅议污水灌溉带来的问题及对策[J]. 节水灌溉,2000(2):23-25.  
 [9] 代志远,高宝珠. 再生水灌溉研究进展[J]. 水资源保护,2014,30(1):8-13.  
 [10] 杨毅,邵惠芳. 北京市实施“把再生水用起来”的对策建议[J]. 水利发展研究,2017,17(2):15-18.  
 [11] 陈晓波. 大连市中心城区再生水利用规划研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.  
 [12] 郑汐,王齐,孙吉雄. 中水灌溉对草坪绿地土壤理化性状及肥力的影

响[J]. 草原与草坪,2011,31(2):61-64.

[13] SEKARAN N. Continuous application of sewage effluent on soil properties [D]. Coimbatore, Nadu, India: Department of Soil Science and Agricultural Chemistry, Tamil Nadu Agricultural University, 1996.  
 [14] 孙吉雄,韩烈保,陈学平. 用二线城市污水灌溉草坪[J]. 草原与草坪,2001(1):36-40.  
 [15] 李晓娜,武菊英,徐彪,等. 再生水灌溉草坪对土壤质量影响的试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):245-249.  
 [16] LADO M, BEN-HUR M. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: A review [J]. Soil and tillage research, 2009, 106(1): 152-163.  
 [17] BEDBABIS S, ROUINA B B, BOUKHRIS M, et al. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate [J]. Journal of environmental management, 2014, 133: 45-50.  
 [18] SOU/DAKOURÉ M Y, MERMOUD A, YACOUBA H, et al. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties [J]. Geoderma, 2013, 200/201(6): 31-39.  
 [19] 李玉明,程波,张泽,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,2006,25(S2):550-555.  
 [20] 李中阳,樊向阳,齐学斌,等. 城市污水再生水灌溉对黑麦草生长及土壤磷素转化的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(8):1072-1076.  
 [21] 韩烈保,王昌俊,苏德荣,等. 不同水质灌溉下绿地养分积累及其比较[J]. 北京林业大学学报,2005,27(6):62-66.  
 [22] MAÑAS P, CASTRO E, DE LAS HERAS J. Irrigation with treated wastewater: Effects on soil, lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop and dynamics of microorganisms [J]. Journal of environmental science and health, Part A, 2009, 44(12):1261-1273.  
 [23] 张洪生,张克强,韩烈保,等. 再生水灌溉对绿地土壤环境的影响[J]. 北京林业大学学报,2006,28(S1):78-84.  
 [24] 焦志华,黄占斌,李勇,等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2010,29(2):319-323.  
 [25] 郭魏,齐学斌,李中阳,等. 不同施氮水平下再生水灌溉对土壤微环境的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(3):311-315,319.  
 [26] 雷琼,李修岭. 城市二级污水灌溉对城市绿地土壤化学性状的影响[J]. 中国土壤与肥料,2013(2):22-25.  
 [27] 王志超,史海滨,李仙岳,等. 回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):196-202,277.  
 [28] CHEN W P, LU S D, PAN N, et al. Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas [J]. Chemosphere, 2015, 119(1):654-661.  
 [29] 孟建林,王齐,师春娟,等. 短期中水灌溉对不同绿地植物根系层土壤性质的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2012,47(6):114-119.  
 [30] 夏江宝,谢文军,陆兆华,等. 再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响[J]. 生态学报,2010,30(15):4137-4143.  
 [31] STEWART H T L, HOPMANS P, FLINN D W, et al. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia [J]. Environmental pollution, 1990, 63(2):155-177.  
 [32] 郑伟,李晓娜,杨志新,等. 再生水灌溉对不同类型草坪土壤盐碱化的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(4):101-104.  
 [33] QIAN Y L, MECHAM B. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways [J]. Agron J, 2005, 97(3):717-721.  
 [34] 王昌俊,韩烈保,杨永利,等. 污水处理水灌溉对绿地土壤盐碱化的影响[J]. 河北农业大学学报,2005,28(4):18-22.  
 [35] 左海涛,武菊英,温海峰,等. 再生水灌溉对草坪草生长和土壤的影响[J]. 核农学报,2005,19(6):474-478.  
 [36] 张娟,王艳春. 再生水灌溉对植物根际土壤特性和微生物数量的影响[J]. 节水灌溉,2009(3):5-8.  
 [37] 吕斯丹,陈卫平,王美娥. 模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响[J]. 环境科学,2012,33(12):4108-4114.  
 [38] 龚雪,王继华,关键飞,等. 再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响[J]. 环境科学,2014,35(9):3572-3579.  
 [39] 韩烈保,周陆波,甘一萍,等. 再生水灌溉对草坪土壤微生物的影响[J]. 北京林业大学学报,2006,28(S1):73-77.  
 [40] 巫常林,黄冠华,刘洪禄,等. 再生水短期灌溉对土壤-作物中重金属分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(7):91-96.  
 [41] SMITH C L, HOPMANS P, COOK F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia [J]. Environmental pollution, 1996, 94(3):317-323.

藏在继承传统贮藏方法的同时,应注意吸收现代贮藏方法新技术、新设备。未来还要加强引进新贮藏技术手段,运用现代科学理论和先进技术,增加中药材贮藏的科学研究,使块茎类种栽在贮藏技术上更加先进和科学规范,将一些科学合理、经济实用的现代贮藏新技术应用到实际中,推进中药现代化发展。

### 参考文献

[1] 王栋,范圣此,李安平. 中药材贮藏方法的研究进展[J]. 中国现代中药,2013,15(5):416-419.

[2] 杜世明. 浅谈中药炮制品的变异现象及预防措施[J]. 湖南中医杂志,2000,16(5):54-55.

[3] 关艳娟,冯艳梅,高励聪. 中药贮藏过程中品质变异的原因[J]. 现代中西医结合杂志,2003,12(2):188-189.

[4] 罗新舟. 浅谈中药饮片变质现象及贮存养护方法[J]. 湖北中医杂志,2007,29(5):54.

[5] 黄新. 中药房中药材变色的原因与防治措施[J]. 亚太传统医药,2013,9(6):223-224.

[6] 刘程惠,胡文忠,姜爱丽,等. 不同贮藏温度下鲜切马铃薯的生理生化变化[J]. 食品与机械,2008,24(2):38-42.

[7] CHENG S H, SU Z H, XIE C H, et al. Effects of variation in activities of starch-sugar metabolic enzymes on reducing sugar accumulation and processing quality of potato tubers [J]. Journal of integrative agriculture, 2004, 3(7):519-527.

[8] LIN Y, LIU T F, LIU J, et al. Subtle regulation of potato acid invertase activity by a protein complex of invertase, invertaseinhibitor, and SUCROSE NONFERMENTING-RELATED PROTEIN KINASE I [J]. Plant physiology, 2015, 168(4):1807-1819.

[9] NAVRÁTIL O, BUCHER P, VACEK J. Transgene coding of a key enzyme of the glycolytic pathway helps to decrease sugar content in potato tubers [J]. Czech journal of genetics & plant breeding, 2012, 48(1):42-45.

[10] JANAVE M T, THOMAS P. Influence of post-harvest storage temperature and gamma irradiation on potato carotenoids [J]. Potato research, 1979, 22(4):365-369.

[11] 马东梅. 不同温、湿度条件对秋冬萝卜贮藏的影响[J]. 吉林蔬菜, 2010(6):71-72.

[12] 崔磊,袁伟玲,甘彩霞,等. 不同品种、湿度、时间对萝卜贮藏的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(21):5605-5608.

[13] 伍贵方,蒙迪冰,罗全丽,等. 马铃薯种薯贮藏技术研究初报[J]. 贵州农业科学, 2003, 31(6):46-47.

[14] 谢开云,何卫,曲纲卢,等. 马铃薯贮藏技术[M]. 北京:金盾出版社, 2011.

[15] 薛彦斌. 近三十年苹果气调贮藏进展与最新动态[J]. 北方园艺, 1991(7):32-35.

[16] 王霞. 沼气在生姜贮藏中的应用[J]. 中国沼气, 2007, 25(1):43-45.

[17] 张育辉,李秀芳. 影响中药饮片质量因素及其对策[J]. 实用中医内科杂志, 2008, 22(12):86-87.

[18] 陈科元,陈彦云,贾倩民,等. 不同光照对贮藏期间马铃薯块茎多胺含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(24):143-148.

[19] 李莹. 中药的贮藏[J]. 中华医学实践杂志, 2005, 4(7):700.

[20] 黄振国. 中药的对抗贮藏法[J]. 福建中医药, 1992, 23(5):19-20.

[21] 董颖. 中药饮片贮存与保管[J]. 时珍国医国药, 2000, 11(12):1060.

[22] 王建升,杨辉,刘俊玲. 中药饮片的水分含量与储存养护[J]. 中医药信息, 2009, 26(1):35-36.

[23] 安正南. 探讨中药材的养护[J]. 中国医药指南, 2013, 11(17):278-279.

[24] 韦萍. 中药饮片贮藏中的变质现象与预防对策浅析[J]. 广西中医学院学报, 2005, 8(4):75.

[25] WANG X Z, SUN H T, SUN J, et al. Effects of different storage temperature on nutritional quality of potato cultivar Kexin No. 1 [J]. Agricultural science & technology, 2015, 16(4):810-814.

[26] 张亚川,郑冬梅,贾艳宇. 贮藏温度对马铃薯品质的影响[J]. 马铃薯杂志, 1999, 13(2):120-123.

[27] 陶正明,姜武,郑福勃,等. “温郁金1号”新品种选育[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(20):3910-3914.

[28] 孙海燕,马骏,钟爱民,等. 不同保鲜包装对天麻贮藏生理和效果的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(12):329-334.

[29] 赵瑞雪,陈湘宁,许丽,等. 鲜切马铃薯片在四种包装材料下的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18):336-339.

[30] GÓMEZ F, FERNÁNDEZ L, GERGOFF G, et al. Heat shock increases mitochondrial H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production and extends postharvest life of spinach leaves [J]. Postharvest biology and technology, 2008, 49(2):269-278.

[31] 王鸿飞,邵兴锋. 果品蔬菜贮藏与加工实验指导[M]. 北京:科学出版社, 2012:85-86.

[32] 高爱东. 中药饮片的贮藏与保管[J]. 中医学刊, 2006, 24(5):908.

[33] 王亭兰. 浅谈中药材的养护[J]. 中国中医药现代远程教育, 2009, 7(3):138.

[34] 宋坤,陈建伟,姜国非. HPLC 研究加工、贮藏过程对温郁金化学成分的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(24):61-64.

[35] 郑桥云. 生姜保鲜贮藏法[J]. 农家参谋, 2012(4):33.

[36] 徐海涛. 天麻贮藏把“三关”[N]. 山东科技报, 2005-01-21(005).

[37] 曾应江. 半夏种子的采集和贮藏技术[J]. 种子科技, 2017, 35(2):56-59.

[38] 李兰. 中药泻泻采收加工和贮藏养护技术研究[D]. 南京:南京中医药大学, 2009.

[39] 陈菁瑛,陈熹,刘波,等. 建泽泻种子贮藏特性研究初报[J]. 现代中药研究与实践, 2005, 19(6):20-22.

[40] 张锐,陈玉成,于天颖,等. 马铃薯贮藏特性及条件[J]. 农业科技与装备, 2012(9):67-68.

[41] 张亚川,郑冬梅,贾艳宇. 贮藏温度对马铃薯品质的影响[J]. 马铃薯杂志, 1999, 13(2):120-123.

[42] 张涛. 延胡索特征特性及栽培技术[J]. 现代农业科技, 2011(18):169.

[43] 姜成. 中药贮藏方法探要[J]. 实用中医内科杂志, 2008, 22(5):98.

[44] ARDITTI J. Factors affecting the germination of orchid seeds [J]. Bot Rev, 1967, 33(1):1-97.

[45] 黄丰,李谦,张义华,等. 新技术在中药贮藏中的应用[J]. 中药通报, 1988, 13(6):54.

[46] 郭衍银,年彬彬,吕凤艳. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气调对贮藏期间姜蛆生理代谢及死亡率的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(8):272-276.

[47] 陶薇,马梅芳. 浅谈中药贮藏保管新技术[J]. 实用中医药杂志, 2008, 24(3):200.

(上接第136页)

[42] 杨军,陈同斌,雷梅,等. 北京市再生水灌溉对土壤、农作物重金属的污染风险[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2):209-217.

[43] ZHAO Z M, CHEN W P, JIAO W T, et al. Effect of reclaimed water irrigation on soil properties and vertical distribution of heavy metal [J]. Chinese journal of environmental science, 2012, 33(12):4094-4099.

[44] 杜娟,范瑜,钱新. 再生水农灌过程中重金属迁移规律研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(7):74-77, 82.

[45] 金爱芳. 不同灌溉条件下多环芳烃在包气带中的迁移规律研究[D].

北京:中国地质大学(北京), 2010.

[46] 陈素媛,何江涛,金爱芳,等. 多环芳烃在不同灌区土壤剖面的分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10):10-14, 63.

[47] MAHJOUR O, LECLERCQ M, BACHELOT M, et al. Estrogen, aryl hydrocarbon and pregnane X receptors activities in reclaimed water and irrigated soils in Oued Souhil area (Nabeul, Tunisia) [J]. Desalination, 2009, 246(1/2/3):425-434.

[48] 何江涛,金爱芳,陈素媛,等. 北京东南郊再生水灌区土壤 PAHs 污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):666-673.