

劣质水的灌溉利用[•]

薛 峰 杨劲松

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘要

开发利用劣质水资源(包括微咸水、咸水和低矿化碱性水)进行灌溉是缓解当前水资源短缺、提高粮食产量,减缓日益增长的粮食、人口、资源、环境矛盾的重要内容。本文中分析了劣质水的起源和利用潜力,探讨了由于劣质水的分布或开发利用不当所引起的一系列生态环境问题,如:(1)土壤盐渍化、涝渍现象等土壤退化问题;(2)水源的污染问题;(3)对农业环境的影响和生态系统的扰动。提出了可持续利用劣质水灌溉,防止土地质量下降,保护农业生态环境,保证农业持续发展的土壤、生物、水分和灌溉管理的措施和对策。

关键词 劣质水;盐渍化;持续发展;生态环境

1 开发利用劣质水是缓解水资源短缺的重要内容

到本世纪末,世界人口总数将达到 63 亿,对粮食的需求量预计将增加一倍,而世界种植面积只增长 10%,因此,必须提高世界农业的单位面积产量,更有效地利用有限的水土资源,发展粮食生产。世界灌溉农业的扩大为缓解人类对粮食与纤维的平衡供需矛盾起了显著的作用。到 1990 年,世界灌溉农田已发展到 2 亿 2 千万公顷,有近 60% 的农业产量来自于灌溉农业^[1,2]。但在近期,灌溉农业的扩大受到了水土资源的限制。

根据最近的估计^[3],世界上总储水量为 $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$,其中淡水 $3.5 \times 10^7 \text{ km}^3$,仅占总储量的 2.5%。随着工农业的发展和人口的不断增加,淡水资源日趋紧张。我国现人均占有水资源 2600 m^3 ,本世纪末将下降至 2200 m^3 ,全国缺水 $480\text{--}1060 \text{ 亿 m}^3$ ^[4]。水资源特别是优质水资源的匮乏日益突出,已成为粮食生产中的一个重要限制因素,严重阻碍了“高产、高效、优质”持续农业的发展。

与此同时,在干旱半干旱地区和滨海地带,缺水地区常有水质较差的劣质水(包括咸水、微咸水和低矿化碱性水等)的分布,例如,阿尔及利亚撒哈拉自流盆地,第四纪沉积物中全部为矿化水;巴基斯坦矿化水分布占北部面积的 37%,南部则占 58%;我国也有大面积的矿化水分布,黄淮海平原有矿化水区面积 $989,850 \text{ km}^2$,其中浅层矿化水区(包括表部浅层淡水小于 10cm 的)为 $469,960 \text{ km}^2$,下伏矿化水的浅层淡水区为 $51,995 \text{ km}^2$ 。黄河三角洲地下水矿化度为 5—10—30g/L,全部为矿化水^[6];另外,在我国的东北松嫩平原、黄泛平原、内蒙古大小黑河流域、山西大同、阳高盆地、宁夏、甘肃河西走廊等地都有大面积的低矿化碱性水分布。以河北省黑龙港地区为例,其深层低矿化碱性水的分布面积达 70% 左右^[10]。水资源的短缺使劣质

• 国家自然科学基金资助项目(49571036)。

水的开发利用愈来愈受到关注。要解决粮食问题,还必须在发展节水农业的同时,开发新的灌溉水源——利用劣质水进行灌溉。

2 劣质水的起源及灌溉利用的增产潜力

劣质水和盐渍土常常是相互伴生的,它们是自然发展史中,特别是第四纪构成干旱地带景观和地下水的基本要素。水质的矿化除在自然形成过程发生外,也有人为因素的作用,其起源主要有以下几种形式:

(1)海水入侵和盐水倒灌。在海岸带的咸淡水交界面,由于地下水的过度开采或大型水利工程的修建等原因,使得咸水侵入地下淡水水体,污染地下淡水。另外,受海潮涨落的影响,海水顺着排水沟或河流入海口等倒灌入内陆,引起地表水矿化。

(2)下伏地下矿化水的上涌。在集中开采地下淡水时,下伏于淡水层的地下咸水由于水动力学的改变,可能会呈锥形上升,使上层水源的矿化度升高。

(3)存贮于岩层中的地下水,由于溶解大量的可溶性盐分,引起水质矿化,一般来说,其矿化度随埋深的增加而升高;其水化学类型表现出一定的规律性,富含 SO_4^{2-} 的咸水位于浅层, CO_3^{2-} 碱性水位于中层, Cl^- 为主的咸水位于深层^[7]。

(4)灌溉后的排水。灌溉时,水分在土壤中运动的过程中溶解大量的可溶性盐分,使排水的含盐量升高。

利用劣质水进行灌溉,主要适用于以下的情况:(1)获得优质水的价格昂贵,或优质水源匮乏,远不能满足作物整个生长季节的需水要求;(2)利用灌溉后的排水灌溉,一方面可节省淡水资源,另外还省去处理含盐分较高的排水的环节,并防治了人为造成劣质水源的形成。在上述情况下利用劣质水灌溉,国内外已取得了许多经验,美国、澳大利亚、以色列、埃及、印度等先后有过成功的报道。如美国西南部一些地区包括 Colorado 州的 Arkansas River Valley、Arizona 州的 Salt River Valley 等利用咸水(其电导率 EC=1.0~7.0 dS/m)进行灌溉已有近百年的历史,他们甚至利用 EC 超过 8 dS/m 的咸水进行灌溉,也取得了较高的产量。印度的一项田间调查表明,用 EC 为 4~6 dS/m 浅层地下咸水灌溉不同的作物,产量只下降 14—26%,而且没有引起土壤盐渍化^[8,9]。方生等报道,我国黑龙江地区利用碱水、碱性水进行灌溉可使作物在需水临界期因浇上关键水而增产,其抗旱增产效果十分显著(表 1)^[10]。

表 1 咸水、碱性水灌溉作物产量与增产效果(方生等,1993)

作物	咸水灌溉						碱性水灌溉			
	不灌对照 (kg/亩)	小于 1g/L		2~4g/L		4~6g/L		亩产 (kg/亩)	增产 (%)	不灌对照 (kg/亩)
冬小麦	56	323.2	477	242	332	195	248	301.3	862	31.3
玉米	156	369.5	137	315	102	269.1	73	386.1	163	147
合计	212	692.7	227	557	163	464.1	119	687.4	285	178.3

3 劣质水的利用不当对农业生态环境的危害

开发、利用劣质水可在一定程度上缓解水资源匮乏的矛盾,但利用不当、管理不善,常常会

带来一系列的问题,这与农业的持续发展是背道而驰的。现将主要问题归纳如下。

3.1 土壤退化

劣质水的灌溉利用不当常会引起土壤次生盐渍化、碱化以及涝渍等土壤退化问题,严重影响农业生产环境,造成土地质量下降,引起作物减产。

利用劣质水灌溉,灌溉水中的大量盐分进入土壤,大部分水分为植物蒸腾和土壤蒸发作用所消耗,而盐分则在土壤中积累,当根区土壤中盐分含量积累到一定程度时,就会发生土壤盐渍化,土壤盐分含量随灌溉使用的劣质水量及其含盐量的增加而升高。利用碱性水灌溉时,由于灌溉水有较高的钠吸附比 [$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{1/2(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$] 及残余碱度 [$RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$],会造成土壤次生碱化,导致土壤结构破坏,土壤粘粒分散、物理性质变差。

土壤涝渍现象主要是由于灌溉效率过低、排水状况不良造成的。灌溉渠道不畅通、水分输送缓慢、田间管理不适宜,排水条件差等都可引起土壤渍水。据研究,灌水的有效利用系数一般在 0.3—0.4 之间,约 57% 左右的水量在水分传输和分配过程中损失,其损失途径主要是通过渠道渗漏、侧渗和深层渗透等,或补给地下水,使地下水位升高;或流向地势低平的洼地,造成土壤积水,引起土壤涝渍的发生。利用劣质水灌溉使得上述情况更加严重,并存在潜在的次生盐渍化威胁。

3.2 水源污染

应用劣质水灌溉后,一部分水被植物利用和土壤蒸发,剩余的水或被排放,或者透过根区,渗入土壤底层与深层入渗水、渠系渗漏水等汇集,这些水通常在迁移过程中溶解了大量土壤盐分,成为一种盐分污染源,当被排放到河流、水库、湖泊或渗入到地下水中时,就会污染优质水资源。

水源的污染除了与灌溉和排水管理不善有关外,Rhoads 等人^[11]研究认为,还与淋洗比(LF)有关。随着淋洗比的减少,从土壤中带走的盐分数量及排出水的体积都显著降低。这是因为,淋洗比减少,使得灌溉水中的盐分与土壤胶体间发生沉降的量相对增加,而溶解的土壤矿物风化分解的盐分量相对减少。

3.3 对农业环境的影响和生态系统的扰动

劣质水的利用不当导致土壤盐分增加,土壤物理、化学特性恶化,同时还具有一定的生物毒性,使土地质量和利用价值大幅度下降。全世界约 25 亿公顷灌溉土地中,有半数以上受盐渍化和涝渍的严重影响,其中每年有近 1000 万公顷灌溉土地弃耕。土壤环境的变化,作物生长条件恶化,土地适种性能变差,作物出苗、生长和发育受到抑制、毒害,进而引起土地肥力水平的下降,作物产量大幅度减少,品质下降或草地载畜量降低^[12]。

其次,不适宜的劣质水灌溉常常会扰动和破坏生态系统的稳定,导致生态系统结构的改变和生境条件的变化。水分的调蓄、传输和再分配及污染对生物多样性有很大的影响,使野生生物的种类、数量和质量发生很大的变化。许多湿地生物由于河流水量减少、水质的污染或地下水的枯竭而消失。鱼类、禽类由于超量摄入排水所释放到河流的过多的盐分遭受毒害。

此外,劣质水所携带的盐分可直接或间接地毒害人畜健康。澳大利亚热带地区常有牲畜由于饮用了咸水而死亡,其肾脏和其他器官都受到了含盐水或碱性水的毒害^[13]。

4 可持续地利用劣质水的管理技术和对策

持续农业要求所有管理技术绝不以破坏资源、牺牲环境来换取短暂的丰收和经济效益^[14]。这一点尤其适用于劣质水的管理。所谓可持续地利用劣质水灌溉，包含两点意思：第一，劣质水的存在，是潜在的污染源，本身就是农业生态环境恶化的一种威胁，合理地开发和利用劣质水源，将会降低或消除这种威胁；第二，采用适宜的土壤、灌溉、作物栽培管理技术，在保证土地质量，避免土壤退化和土地生产力水平下降以及不造成农业生态环境危害的前提下，最大限度地利用劣质水资源；在防范和避免盐分对作物危害的同时，获得较高的作物产量。劣质水灌溉过程中主要管理措施和对策建议有如下几个方面。

4.1 改良灌溉水质

4.1.1 混灌 改良灌溉水质的方法之一就是将两种不同的灌溉水混合使用，包括咸水与淡水混合即咸淡混灌、咸水与低矿化碱性水混合即咸碱混灌以及两种不同盐渍度的咸水混合灌溉等，以降低灌溉水的总盐渍度或改变其盐分组成（降低 SAR）。混灌不仅提高了灌溉水的水质，而且增加了可灌水的总量。陈秀玲等^① 将咸水与低矿化碱性水混合使用，使混合后的灌溉水质比混前大大提高，灌后土壤理化性状比咸、碱水单独使用有所改善，作物产量提高。

4.1.2 轮灌 轮灌是指根据水资源的分布、作物布局、作物生长期等交替使用不同水质灌溉水进行灌溉的一种方法。比如，旱季用咸水，雨季后有河水时用淡水；耐盐作用如棉花等用咸水，弱耐盐作物如玉米、大豆等用淡水；作物苗期对盐分敏感阶段用淡水，而中后期较耐盐阶段用咸水。轮灌有效地提高了劣质水资源的灌溉利用，充分发挥咸水和淡水各自的作用与效益。

4.1.3 施改良剂 将改良剂施入灌溉水以提高灌溉水水质的方法主要适用于低矿化碱性水的改良。矿化碱性水可溶性盐分含量不高，但由于其中过量的 Na^+ 、 CO_3^{2-} 或 HCO_3^- 的存在而导致有较高的钠吸附比(SAR)或残余碳酸钠(RSC)引起土壤理化性状变差，作物减产。施入改良剂如石膏或酸性物质如硫磺、硫酸等可以提高灌溉水中 Ca^{2+} 的浓度或中和灌溉水中的碱性物质，从而降低 SAR 和 RSC，提高灌溉水质。据研究^[15]，在低矿化碱性灌溉水流中施入可溶钙 $1\text{--}4 \text{ meq L}^{-1}$ ，灌溉水的渗透速率可以提高 100—300 %。

4.2 加强劣质水灌溉条件下盐渍农业管理

4.2.1 作物品种及栽培管理 根据作物对盐分敏感程度的不同，选择种植在盐渍环境下能取得较高产量的耐盐和喜盐作物种类和品种，几种主要作物的耐盐性列于表 2，其中，中度耐盐型和耐盐型等作物品种适宜于在盐渍环境中种植并取得较好农业产量。一般作物苗期对盐分比较敏感。因此，作物播种和出苗期间最好不要使用劣质水源进行灌溉。作物栽培上，要避开盐分积累的地方进行播种或移栽。

4.2.2 灌溉管理 掌握节水灌溉技术，提高灌溉效率。灌水方式有地面灌溉（如沟、畦灌及淤灌等）、喷灌、滴灌等，不同的灌水方式各有其优缺点，其水分的利用效率，水分在土壤中运动的方式，盐分在土层中积累和分配的范围和程度各不相同。另外，灌溉制度也影响到作物水分供应和土壤中盐分数量与分配的变化，不同的灌水强度、灌溉频度过土壤湿度变化输入土壤中的盐分总量、耕层盐分积累状况存在着差异。因此，掌握好灌溉技术是劣质水利用很关键的步

^① 陈秀玲等，咸水、碱性淡水、混合水灌溉与地下水水质改造的研究。河北省水利科学研究所(内部资料)。

表 2 主要作物对饱和土壤浸提液的耐盐性^[16](Mass, 1990)

作物	耐盐临界值 ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	盐渍度每增加 $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$	
		产量减少的百分数 (%)	
盐敏感型			
杏(Apricot)	1600	24.0	
黄豆(Bean)	1000	19.0	
萝卜(Carrot)	1000	14.0	
葡萄(Grapefruit)	1800	16.0	
柑橘(Orange)	1700	16.0	
洋葱(Onion)	1200	16.0	
桃(Peach)	1700	21.0	
草莓(Strawberry)	1000	33.0	
中度敏感型			
苜蓿(Alfalfa)	2000	7.3	
扁豆(Board bean)	1600	9.6	
谷类(Corn)	1700	12.0	
黄瓜(Cucumber)	2500	13.0	
莴苣(Lettuce)	1300	13.0	
土豆(Potato)	1700	12.0	
水稻(Rice)	3000	12.0	
甘蔗(Sugarcane)	1700	5.9	
番茄(Tomato)	2500	9.9	
中度耐盐型			
大麦草	6000	7.1	
(Barley grass)	6800	16.0	
高粱(Sorghum)	5000	20.0	
大豆(Soybean)	6000	7.1	
小麦(Wheat)	8000	5.0	
耐盐型			
棉花(Cotton)	7700	5.2	
甜菜(Sugar beet)	7000	5.9	
矮小麦 (Semidwarf Wheat)	8600	3.0	

排水条件是指良好的排水出路, 通过明沟排水、暗管排水、竖井排水或井渠结合的方式, 控制农田地下水位在临界深度以下。

灌溉后的排出水一般含有较高盐分, 应通过截流和隔离的办法加以处理, 即在人为控制的条件下排出, 降低排出水入渗, 防止其污染优质水源或危害农业生态环境。排出的灌溉水可以再循环利用, Rhoads 等^[19]提出了“作物轮用, 水轮灌”的方式利用排放的咸水, 另一种循环利用排出水灌溉的对策, 是将排放的咸水与淡水或含盐较低的水混合施用^[20]。目前看来, 这两种方法都有其局限性。对于循环利用后的排水或含盐量过高不能再利用的排出水, 不可轻易

骤。适宜的灌溉方式、灌溉制度的选择要参照当地土壤特征、作物种植情况、水源供应及排水条件等, 同时要考虑到灌溉、淋洗、排水三者的关系, 保持田间土壤水分及盐分平衡。

高效的水分传输系统可以减少水分损失、提高水分利用率, 同时可避免土壤次生盐渍化和涝渍现象的发生。提高水分传输效率的措施主要有: 疏通沟渠, 防止淤积、堵塞; 降低沟渠渗透性, 防止水分渗漏流失; 减缓渠系的高低起伏, 提高水流速度。

4.2.3 淋洗管理 利用劣质水灌溉时, 劣质灌溉水所携带的盐分会在土壤根层累积, 并且灌溉水量越高, 浓度越大, 根层盐分积累越多。因此, 利用劣质水灌溉时, 要保持土壤根层盐分平衡, 淋洗是十分必要的步骤。淋洗水量是指超过从土壤表层渗透到根层以下的那一部分灌溉水量, 这部分水将土壤根层的盐分排出, 以免作物受到过量盐分的危害。淋洗频率及淋洗需水量取决于灌溉及淋洗用水水质、土壤及气候条件、种植作物的耐盐性等。有关研究^[17]表明, 劣质水灌溉后, 淋洗效果大大好于不淋洗处理, 即使用咸水作为淋洗用水也可以降低盐分在土壤根层的积累, 且间隔性地进行淋洗(当土壤根层有过量盐分集聚时)优于每次灌水时都进行淋洗, Hamdy 等人^[18]进一步研究指出, 咸水灌溉两个月后淋洗效果最好。

4.2.4 排水管理 利用劣质水进行灌溉要有良好的排水条件。一是防止水分在土体中过多地积累引起涝渍, 二是保证灌溉水携入土壤耕层的积盐, 可以通过降雨和淡水灌溉淋洗排出, 使年内土壤盐分保持平衡或脱盐趋势。

排放,有条件的可直接排入海洋,内陆地区可以利用自然地形条件或人工建造蒸发塘,蒸发塘可控制水分渗漏,排水排入蒸发塘,并在人为监测条件下蒸发逸出。

以上只是一般的劣质水利用管理的一些对策建议,在实际开发利用劣质水时,要结合当地的土壤、气候、水文、地质等自然条件以及社会经济条件,因地制宜、因水制宜地建立起适合当地条件的劣质水利用模式。

参 考 文 献

- [1] Jensen M.E., Rangeley W.R. and Dieleman P.J., Irrigation trends in world agriculture, In: Irrigation of Agricultural Crops, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1990, 31—67.
- [2] FAO., World Agriculture Toward 2000: An FAO Study, N. Alexandratos eds., Bellhaven Press, London, 1988, 338.
- [3] Zonn I.S., 干旱地区的土地和水资源,格拉西莫夫主编,王广颖、潘科炎译,干旱地区土地开发及抗荒漠化的综合途径,中国环境科学出版社,1991,20—27。
- [4] 赵其国,九十年代的土壤科学,中国土壤学会,中国土壤科学的现状与展望,江苏科技出版社,1991,1—7。
- [5] 石元春、辛德惠,黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理。河北人民出版社,1983。
- [6] 刘淑瑶、谢逸民,近代黄河三角洲的区域特征及开发利用,土壤通报,1993,24:8—10。
- [7] Craig J.R., Saline waters: genesis and relationship to sediments and host rocks, In: Saline Water Proc. Symp. Groundwater Salinity, 46th Annual meeting, R.B. Masttox eds., AAAS, Las Vegas, Nevada., 1980.
- [8] Migameto S., Moore J. and Stichler L., Overview of saline water irrigation in Fast west Texa, In: Water Today and Tomorrow, J.R. Reeloglo and K.G. Renard eds., Proc. Speciality Conf., Irrigation and Drainage Divisionof ASEC, Flagstaff, Arizona, ASEC., New York, 1984, 222—230.
- [9] Boumans J.H., Van Hoorn J.W., Kruseman G.P. and Tenmar B.S., Water table control, reuse of disposal of drainage water in Hargana, Agric. Water Mgmt, 1988, 14: 537—545.
- [10] 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,王遵亲等主编,科学出版社,1993,546—557。
- [11] FAO., The Use of Saline Waters for Crop Production J.D. eds., Rome, 1992, 133.
- [12] 杨劲松,土壤盐演化问题及其研究展望,赵其国主编,土壤圈,江苏科技出版社,1995,331—337。
- [13] Water Resources Commission, Water logging and Land salinization in Irrigated Area of NSW, ACLC, Australia, 1985.
- [14] 沈善敏,中国农业发展趋势、导向对策和土壤科学的任务,中国土壤学会主编,土壤科学与农业持续发展,中国科技出版社,1994,5—9。
- [15] FAO. Irrigation and Drainage Paper No 29, 1985, 174pp.
- [16] Mass E.V., Crop salt tolerance, In: Tanji K.K., eds, Agricultural Salinity Assessment and Management, New York, American Society of Civil Engineers, 1990, 262—304.
- [17] L. Bernstein and L. E. Francois, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1975, 37:931—940.
- [18] A. Hamdy. Saline irrigation practices: Leaching Management. Proceeding of the water and wastewater "90" conference, 24—27 April, Spain, 1990b, 10pp.
- [19] Rhoads J.D., New strategy for using saline waters for irrigation. Proc. ASEC Irrigation and Drainage Speciality Cong., Water today and tomorrow, Flagstaff, Arizona, 1984, 231—236.
- [20] Merri A., Shalhevett J., Stolzy L.H., Sinai G. and Steinhardt R., Managing multi-source irrigation water of different salinities for optimum crop production, BARD Technical Report 1—402—97, Volcani Center, Bet Dagan, Israel, 1986, 172.