

宁夏银北灌区农田排水再利用水质风险评价

王少丽¹, 许迪¹, 方树星², 吴彩丽¹, 杨建国³

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 宁夏水文水资源局, 宁夏 银川 750001;

3. 宁夏农林科学研究院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 基于宁夏银北灌区三个排水干沟 2000 年以来的水质状况监测数据, 对排水沟水质进行综合评价, 开展排水灌溉再利用下的土壤盐渍化风险评价。结果表明, 灌水区排水沟水质指标好于非灌水区, 综合污染指数 < 1.0 , 且年际间的变化呈减少趋势; 灌水区沟水呈弱碱性, 属低矿化度微咸水, pH 值的年内和年际变化较为稳定。农田排水再利用对土壤盐渍化具有潜在风险, 排水条件和土壤透水性相对较好条件下的土壤盐渍化风险程度相对较小。

关键词: 排水再利用; 盐渍化; 综合污染指数; 矿化度; 排引比

中图分类号: S276 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0043-05

排水对于作物生长具有和灌溉同等重要的作用, 特别是在干旱半干旱的盐渍化地区, 适宜的农田排水条件以及排水设施与灌溉工程之间的配套, 可为作物生长提供良好的农田水土环境。随着水资源供需矛盾的日益加剧, 农田排水再利用作为一种缓解水资源短缺矛盾、提高灌溉用水利用率的重要途径, 在国内外许多地区已有较广泛的应用实践^[1,2], 许多研究者指出, 利用农田排水作为补充水源不仅提供给作物所需水分, 同时减小对水环境的影响^[3-5]。农田排水中含有作物所需的氮磷等养分, 作为节水与水肥资源再生利用的重要调控措施, 对提高水资源利用率、减少化肥和农药流失、防治水体富营养化和土地盐渍化、保护农田水环境等具有十分重要的意义。

灌区农田排水能否加以再利用以及作为何种用途, 主要取决于排水沟中的水质状况。通常北方灌区的农田排水, 除含有对作物生长有益的氮磷养分外, 还含有危害作物的盐分和重金属等, 不合理地用于灌溉会导致作物产量和品质下降, 造成或加重土壤次生盐渍化程度。随着黄河流域工农业生产规模不断扩大, 加之近年受气候、环境变化影响使黄河来水量不断减少, 宁夏引黄灌区(青铜峡灌区)水资源供需矛盾日趋凸显。为满足作物生长需求, 当地利用农田排水适时补灌, 避免作物减产, 缓解水源紧张矛盾。为此, 科学评价农田排水灌溉再利用(以下简称排水再利用)水质风险, 可为合理利用农田排水、防治土壤盐渍化提供科学依据。本文基于宁夏银北灌区三个排水干沟 2000 年来的水质监测数据,

在排水沟水质时空动态变化基础上, 评价排水沟水质污染程度, 开展排水再利用下的土壤盐渍化风险评价, 分析排水再利用水量。

1 试验与方法

1.1 灌区概况

银北灌区地处宁夏引黄灌区下游, 总面积 3 518 km², 灌溉面积 21.3 万 hm²。区内降水稀少, 蒸发强烈, 地势平坦低洼, 地下水流动缓慢, 天然排水能力差, 是宁夏土壤盐渍化较重地区。灌区内有惠农渠、汉延渠、唐徕渠、第二农场渠和西干渠五大干渠, 以渠道引黄自流灌溉为主。近年来, 由于黄河来水量的逐年减少, 引黄河水不能满足农业灌溉需求, 利用排水沟水灌溉的需求日益增长。灌区内以沟道排水为主, 有第二排水沟、第三排水沟、第四排水沟、第五排水沟、银新沟五大排水系统, 直接排水入黄河, 其中第三排水沟排水面积最大, 第二排水沟排水面积最小。为了解主要排水沟水质状况及对黄河的影响, 在第三排水沟、四二干沟(第四排水沟的支沟)、第五排水沟和银新干沟上设有全国重要水功能区水质监测站点。银新沟水质监测断面年内每月的 10 日左右采样一次, 第三排水沟和第五排水沟水质监测断面于 3、5、7、9、11、12 月每月的 10 日左右采样一次; 本次分析评价未收集到四二干沟的水质监测数据。

1.2 评价方法

基于银北灌区三个排水干沟—第三排水沟、第五排水沟、银新沟 2000 年、2003 年和 2006 年的水质监测资料, 首先, 根据《地表水环境质量标准》

收稿日期: 2009-09-19

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目课题(2006BAD11B06); 国家自然科学基金重点项目(50639040)

作者简介: 王少丽(1963—), 女, 江苏无锡人, 高工, 博士, 主要从事农田灌溉理论与技术、农田水环境保护方面的研究。E-mail: shaoliw@iwhr.com。

(GB3838-2002)要求,对影响黄河水环境的主要污染指标进行分析评价;其次,根据《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2005)要求,从 16 项基本控制项目标准和 11 项选择性控制项目标准中选择 pH、化学需氧量 COD_{Cr} 、五日生化需氧量 BOD_5 、全盐量(矿化度)、氯化物、总汞、总砷、锌、氟化物、氰化物、挥发酚指标进行单项污染指数和综合污染指数的计算与分析,从灌溉用水角度对排水沟水的水质进行总体评价。2000 年和 2003 年未监测石油类指标,2006 年监测数据表明石油类指标远小于灌溉用水上限标准,不构成污染。为使 3 年的综合污染指数具有可比性,所选指标项中未考虑石油类指标。另外一些指标如镉、六价铬、铅、铜、硒基本上未检出,因此不构成污染,而其他一些指标如苯、硼等均未监测。

考虑到第三排水沟和第五排水沟只在 3、5、7、9、11 和 12 月份有水质监测数据,故以这 6 个月的各项水质指标的平均值作为相应的年平均值,其中以 5、7、11 月份 3 个月平均值作为灌水期(包括冬灌期)平均值。在年和灌水期两个时段内,基于沟水的 pH、 COD 、 BOD_5 、矿化度、氯化物、总汞、总砷、锌、氟化物、氰化物、挥发酚指标,分别计算各指标的年或灌水期污染指数 P_i 和相应的综合污染指数 P ,其中 $P > 1$ 表示水体中存在一种或多种污染物危害, P 值越大,污染危害越严重; $P = 1$ 表示水体达到污染临界线; $P < 1$ 表示污染物对水体不构成综合污染。计算综合污染指数 P 的公式如下,

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i / C_{0i} \quad (1)$$

式中, n 为选择的水质污染指标数量; P_i 为第 i 种污染物的单项污染指数; C_i 为第 i 种污染物的实际年平均值或灌水期均值; C_{0i} 为灌溉水质标准允许的第 i 种污染物上限值。

采用氯离子含量和盐度指标 S 对排水再利用引起的土壤盐化风险进行评价,利用 pH、钠吸附比(SAR)、可溶性钠百分率(SSP)、钠钙镁比(SDR)、残余碳酸钠(RSC)、镁系数(K_{Mg})等指标对排水再利用的土壤碱化风险进行评价,基于矿化度和综合危害系数 K 对排水再利用的土壤盐渍化危害进行综合评价^[6,7]。

2 结果与讨论

2.1 排水沟水质状况综合评价

2.1.1 主要污染指标时空动态变化 根据《地表水环境质量标准》,考虑到 2000 年未监测 COD_{Cr} 指标,选择 COD_{Mn} 、 BOD_5 和铵态氮指标绘出年内及年际动

态变化见图 1。可以看出,各排水沟的污染类型主要为有机污染,银新沟和第三排水沟的上述 3 个指标均超过地表水 V 类水标准。从图 1 给出的各排水沟中的 COD_{Mn} 和 BOD_5 指标还可以发现,银新沟的有机污染状况最严重,第三排水沟次之,第五排水沟较轻。银新沟和第三排水沟的铵态氮指标都较高,根据当地工业废水排放铵态氮的资料显示,这两个沟水中的铵态氮主要来自工业废水污染,而第五排水沟的铵态氮主要来自农业非点源污染。从年际变化状况来看,2003 年由于干旱缺水,灌溉引水量减少,特别是 7 月份排水沟流量比以往小得多,灌水期的有机污染指标有所增大,特别是银新沟和第三排水沟呈增大明显趋势;2006 年部分时间段内银新沟的有机污染指标也明显增大,表明影响该排水沟的工业废水排放量有增加趋势,而第三排水沟和第五排水沟的有机污染指标有减小趋势,说明当地工业废水排放量在减少或工业废水治理有所成效。

各排水沟的总氮为超 V 类地表水标准,银新沟的总磷为超 V 类水标准,第三排水沟和第五排水沟的总磷符合 III 类地表水标准。此外,各排水沟中未检出镉、铅、铜、硒、氰化物等有毒元素,且锌、汞、六价铬、砷等在年内多数月份也未检出,氟化物均低于灌溉用水标准。

当地沟水富含氮磷等养分,直接排入黄河会造成水体的富营养化。从灌溉用水角度考虑,由于第三排水沟和第五排水沟的有机污染指标在灌水期内未超过灌溉水质上限,银新沟灌水期内个别月份存在有机污染指标超标现象。若将排水作为灌溉水源加以合理利用,在为作物生长提供所需水分和氮磷养分的同时,通过土地和生物净化作用可减轻其对下游水体污染的威胁。

2.1.2 排水沟水用于灌溉的水质综合评价 2000 年沟水中除矿化度超出非盐碱土灌溉标准(1 g/l)外,灌水期其它指标均未超标;2003 年和 2006 年银新沟在非灌水期内的 COD_{Cr} 和 BOD_5 超标,且有增大趋势,2003 年第三排水沟在非灌水期和灌水期的 7 月份内 COD_{Cr} 和 BOD_5 超标,而 2006 年则有减小趋势。图 2 给出各排水沟的年和灌水期综合污染指数值年际变化分布。从灌溉水质标准看,各排水沟年综合污染指数值均小于 1,污染物未对水体构成综合危害,第五排水沟的 P 值最小,银新沟相对较大,两沟均有增大趋势;灌水期综合污染指数值均小于 1,且低于年综合污染指数值,第五排水沟的 P 值最小,第三排水沟最大,各排水沟灌水期综合污染指数呈减小趋势。

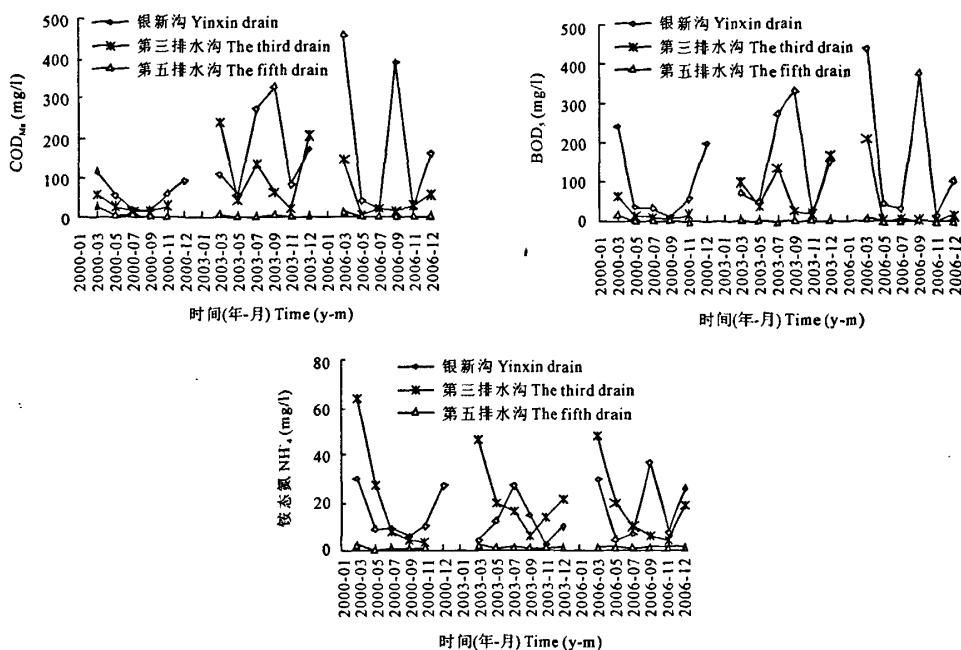
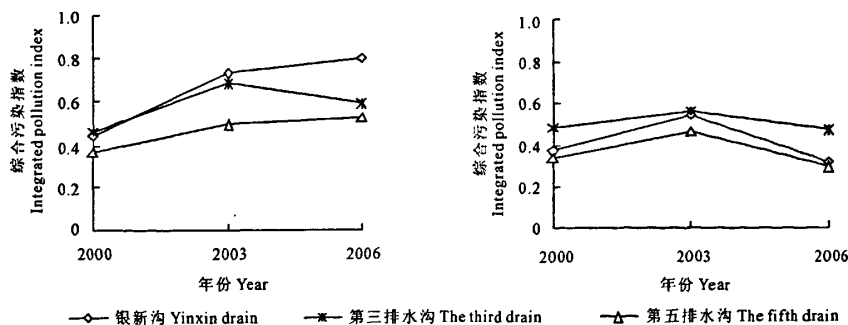
图1 各排水沟中 COD_{Mn} 、 BOD_5 和铵态氮的年内和年际动态变化Fig.1 Intra and inter-annual variation of COD_{Mn} , BOD_5 and NH_4^+ for every ditches

图2 各排水沟的年(左)和灌水期(右)综合污染指数值年际变化

Fig.2 Inter-annual variation of integrated pollution index based on annual and irrigation period

2.2 排水再利用的土壤盐渍化风险评价

土壤次生盐渍化是干旱、半干旱地区灌溉不当可能引发的主要问题,灌溉水质的影响作用明显。由于沟水中含有一定数量的盐分,利用其灌溉有可能加重土壤盐渍化程度,危害作物。因2000年以后仅分析水中的氯化物和硫酸盐指标,故以2000年监测的各沟水中八种离子含量为依据,评价排水再利用的土壤盐渍化风险。

2.2.1 土壤盐化风险评价 沟水灌溉引起的盐化危害,在北方地区主要是指因灌溉而输入土壤的 NaCl 和 Na_2SO_4 所产生的危害,其他盐类危害性居次要,可从主要盐分离子含量和盐度进行评价。由于

排水中的 SO_4^{2-} 含量相对较小,故采用 Cl^- 含量和盐度指标 S 对排水再利用引起的土壤盐化风险进行评价。农田灌溉水质标准中规定的 Cl^- 含量应小于 350 mg/l ,分析表明除2003年灌水期排水沟流量明显偏小、 Cl^- 含量出现大于 350 mg/l 的情况外,通常灌水期的 Cl^- 含量小于 350 mg/l ,排水再利用带来的土壤盐化危害较小,而非灌水期多数时间内 Cl^- 含量都大于 350 mg/l ,超标1~3倍,利用其洗盐和储水灌溉会产生土壤盐化危害。从排水盐度指标 S 来看,第三排水沟灌水期的 $S > 10 \text{ mmol/l}$,排水再利用不利于小麦、玉米作物的苗期生长,银新沟和第五排水沟灌水期大部分时间的 $S < 10 \text{ mmol/l}$,用其灌

溉对土壤盐化的危险较小。综上所述,从氯离子含量指标看,排水再利用引起的土壤盐化风险不大,但从盐度指标看,若持续使用排水灌溉,具有一定的潜在危害,应用中需综合考虑排水条件、土壤通透性、作物耐盐度等因素。

2.2.2 土壤碱化风险评价 利用 pH、SAR、SSP、SDR、RSC、 K_{Mg} 等指标和方法,对排水再利用的土壤碱化风险进行评价。分析表明排水中的 pH 值一般处于 7.8~8.5 之间,不超过灌溉水质上限 8.5,属可用于灌溉的弱碱性水,且年内和年际间的变化较为稳定。灌水期内各排水沟中水的 SAR < 7,属低钠水,可用于灌溉,而其它时间内 $7 < SAR < 13$,为中钠水,宜慎重使用。对 SSP 和 SDR 而言,灌水期第三排水沟的 SSP 略大于 60%, $1.5 < SDR < 2.5$, Na^+ 含量偏高,用于灌溉存在土壤钠质碱化的可能性;银新沟和第五排水沟的 SSP < 60%, SDR < 1.5,灌溉可能产生的土壤碱化作用不大。各排水沟水的 RSC < 0,说明土壤碱害不起主导作用;而从 K_{Mg} 指标看,除银新沟灌水期部分时间内的 $K_{Mg} < 50\%$ 外,通常大于 50%,对作物生长可能产生毒害作用,排水再利用具有使土壤镁质碱化的可能。总体来说,利用排水灌溉可能带来土壤碱化的潜在风险,但风险程度相对较小。

2.2.3 土壤盐渍化影响危害评价 基于矿化度和综合危害系数 K 对排水再利用的土壤盐渍化危害进行评价。根据农田灌溉水质标准,非盐碱土地地区的灌溉水矿化度应小于 1 g/l,盐碱土地地区则应小于 2 g/l,有条件的地区可适当放宽。图 3 显示出各排水沟中水的矿化度年内和年际变化分布。从年内变化特点看,灌水期内的矿化度较小,而非灌水期较大。除 2003 年 7 月和 2006 年 9 月,由于排水沟流量小于往常,导致矿化度偏大外,其它时间灌水期内的矿化度总体小于 2 g/l。各排水沟中,以第五排水沟的矿化度最大,第三排水沟居中,银新沟最低,但彼此相差并不悬殊。从年际变化趋势看,灌水期内的矿化度没有明显增大趋势,而在非灌水期内,2006 年银新沟的矿化度明显增大,这与该沟的有机污染指标增大趋势相一致。从综合危害系数 K 看,灌水期银新沟和第五排水沟的 $K < 25$,水质较好,可安全用于灌溉,而第三排水沟在灌水期 5 月份的 K 值略大,为 32.5,水质一般,具有潜在的土壤盐渍化威胁,此时正处于小麦作物生长的早期,宜采用淡水灌溉,沟水可作为作物生长后期的补充水源,并且对其应用效果应进行跟踪监测。

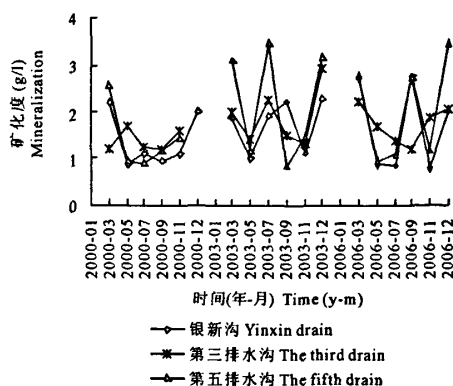


图 3 矿化度的年内和年际变化

Fig.3 Intra- and inter-annual variation of mineralization

综上所述,与水质状态良好的引黄水相比,由于沟水具有不同程度的盐分含量,矿化度相对较高,故长期加以利用灌溉会带来土壤盐渍化的潜在危害。但从总体来说,银北引黄灌区的排水在灌水期内属低矿化度微咸水,在排水条件和土壤透水性良好的农田地区,利用排水补灌对土壤和作物产生的危害作用相对较低。

2.3 排水再利用的水量分析

宁夏引黄灌区(青铜峡灌区)自 20 世纪 70 至 90 年代以来,平均排引比(排水量/引水量)分别为 0.26、0.50 和 0.59(表 1)^[8],排水量占引水量的比值逐步增长。较大的排引比表明,为满足作物需水和淋洗压盐用水需要,该地区需采用较大定额的灌水量。2000~2006 年以来,尽管灌区引水量总体呈减小趋势,但排引比仍为 0.53,即约有 53% 的灌溉回水最终流入黄河。

表 1 宁夏引黄灌区(青铜峡灌区)近几十年来
的引水量和排水量

Table 1 Diverted and drained water amount in recent decades
in Qingtongxia irrigation district, Ningxia

年代 Year	引水量 (亿 m ³) Diverted water (100 million m ³)	排水量 (亿 m ³) Drained water (100 million m ³)	排引比 Ratio
20 世纪 70 年代年均值 Annual average of 1970s	50.37	12.98	0.26
20 世纪 80 年代年均值 Annual average of 1980s	55.69	27.64	0.50
20 世纪 90 年代年均值 Annual average of 1990s	63.05	37.16	0.59
2000~2006 年年均值 Annual average of 2000~2006	52.18	28.64	0.53

位于青铜峡灌区下游的银北灌区,20 世纪 70~

80年代的引水量分别为23.9亿 m^3 和25.4亿 m^3 ,而排水量则分别为11.09亿 m^3 和11.39亿 m^3 ^[9],排引比分别为0.45和0.46。2004~2006年银北灌区排引比分别为0.30、0.25和0.28,虽然排引比明显减少,已小于维持当地水盐平衡的排引比限度^[10],考虑到作物灌溉与洗盐用水需求,排引比不宜再减小,即相对于当前的引用水量,排水量不宜再减小,若能合理利用部分排水量作为补灌水源,则排水再利用的潜力相当可观。

3 结 论

宁夏银北灌区三个排水干沟水质监测资料分析表明,灌水期由于排水沟流量较大,矿化度和污染物指标相对较低,基本不超过灌溉水质上限值,但受中小企业废水排放影响,非灌水期的矿化度和污染物指标明显偏高。各排水沟灌水期综合污染指数均小于1,且小于年综合污染指数,其中第五排水沟的指数值最小,第三排水沟最大。近年来各排水沟灌水期的综合污染指数有减少趋势,但银新沟的有机污染程度较重,为改善水体环境,应大力推进工业废水治污减排工作。

排水再利用的土壤盐渍化风险评价表明,灌水期间沟水为弱碱性低矿化度微咸水,矿化度大多处于非盐碱土地和盐碱土地灌溉水质标准之间,利用排水进行灌溉对土壤盐渍化具有潜在风险,应根据排水条件、土壤通透性、作物耐盐度、各排水沟水质特点等状况,采用合理的灌溉措施与方法,作物生长早期宜用淡水灌溉,作物生长中后期可实施农

田排水补灌。此外,由于近年来水资源紧缺,银北灌区的排引比相应减小,考虑到作物灌溉与洗盐的用水需求,排水量不宜再有显著的下降,利用部分排水作为灌溉补充水源加以再利用的潜力相当可观。

参 考 文 献:

- [1] Willardson L S, Boels D, Smedema L K. Reuse of drainage water from irrigated areas[J]. Irrigation and Drainage Systems. 1997, 11: 215—239.
- [2] Willam A J, Atac T, John L. Effect of travel time on management of a sequential reuse drainage operation[J]. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 1122—1126.
- [3] Shannon M C, Grieve C M. Options for using low - quality water for vegetable crops[J]. Hort Sci, 2000, 35(6), 1058—1062.
- [4] Kaffka S, Oster J, Corwin D. Forage production and soil reclamation using saline drainage water//Proc. of 2004 National Alfalfa Symp and 34th CA Alfalfa Symp[C]. San Diego, CA: Department of Agricultural and Range Science Cooperative Extension, UC Davis, Davis, USA, 2004: 247—253.
- [5] Qadir M, Oster J D. Crop and irrigation management strategies for saline - sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture[J]. Science of the Total Environment, 2004, 323: 1—19.
- [6] 许迪,蔡林根,王少丽等.农业持续发展的农田水土管理研究[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [7] 宋新山,邓伟,闫百兴.松嫩平原西部水环境中各盐碱化成分的变异特征[J].东北水利水电,2002,20(9): 45—56.
- [8] 汪珊,张宏达,汪林.宁夏青铜峡灌区水土盐量的衰减和积累进程分析[J].水利学报,2005,36(3): 365—377.
- [9] 罗代雄,马云瑞,何尚仁,等.银北河西灌区水盐平衡状况与盐渍土改良关键技术措施[J].宁夏农林科技,1995, (1): 39—43.
- [10] 汪林,甘泓,汪珊,等.宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

Evaluation of water quality hazard of drainage reuse in Yinbei irrigation district, Ningxia

WANG Shao-li¹, XU Di¹, FANG Shu-xing², WU Cai-li¹, YANG Jian-guo³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100048, China;

2. Hydrology Bureau of Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750001, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

Abstract: This paper analyzed the water quality of drainage water and saline-alkaline hazard of drainage reuse based on water quality data of three drainage ditches since 2000 in Yinbei irrigation district, Ningxia. The results showed that every index of drainage water during the irrigation was better than that during the non-irrigation, the integrated pollution indexes were all less than 1.0. The integrated pollution indexes, which were calculated based on irrigation period, had a decreasing trend year by year. The drainage water in the ditches belongs to weak alkaline water with low mineralization during the irrigation, and the annual and inter-annual variations of pH were basically steady. The drainage reuse might bring the potential saline-alkaline hazard for soil. In the regions where there are good drainage and ventilated soil, the saline-alkaline hazard was smaller.

Keywords: drainage reuse; saline-alkaline; integrated pollution index; mineralization; drainage-diversion ratio