

内蒙古河套灌区解放闸灌域 地下水水质与硝态氮时空变化研究

屈忠义¹ 林雪松¹ 冯兆忠² 李 茂³ 王长生³ 曹 明¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;
2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;
3. 内蒙古河套灌区解放闸灌域管理局, 内蒙古 陕坝 015400)

摘要: 为了研究节水工程改造及节水灌溉对区域农田地下水及硝态氮淋失污染的影响, 以内蒙古河套灌区解放闸灌域为研究区域, 对整个作物生长期的 3 月、5 月、7 月、9 月分别取水样进行水化学和硝态氮测试分析。对 2003 年与 2008 年区域内 27 眼井地下水硝态氮的时空分布特征进行研究, 结果表明: 在 2003 年间, 夏灌前解放闸灌域地下水硝态氮质量浓度大于 10 mg/L 的面积占灌域总面积的 9.95%, 全年平均硝态氮质量浓度大于 10 mg/L 的面积占灌域总面积的 9.02%。2008 年 3 月硝态氮质量浓度大于 10 mg/L 的面积占灌域总面积的 5.22%, 全年平均硝态氮质量浓度大于 10 mg/L 的面积占灌域总面积的 5.20%。2003 年与 2008 年的监测结果及时空分布趋势说明该地区地下水存在较严重的面源氮污染, 但节水灌溉的实施可能对减少河套灌区的化肥淋失和地下水污染具有积极的改善作用, 特别是由于秋浇水量的减少, 地下水位下降, 对减少地下水硝态氮污染具有明显的作用。

关键词: 河套灌区; 节水灌溉; 硝态氮; 时空变化

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2010)02-0040-05

Temporal and spatial Changes of farmland nitrate nitrogen and groundwater quality in Jiefangzha irrigation area of Hetao irrigation district of Inner Mongolia Autonomous Region//QU Zhong-yi¹, LIN Xue-song¹, FENG Zhao-zhong², LI Mao³, WANG Chang-sheng³, CAO Ming¹(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Jiefangzha Irrigation Management Bureau of Hetao Irrigation District of Inner Mongolia Autonomous Region, Shanba 015400, China)

Abstract: In order to study the influence of reconstruction of water-saving projects and water-saving irrigation on the leaching pollution of nitrate nitrogen and groundwater quality in regional farmlands, the Jiefangzha irrigation area of Hetao irrigation district of Inner Mongolia Autonomous Region was selected as a research case. The water chemistry and nitrate nitrogen contents of groundwater samples from the whole area during the entire crop growing period (in March, May, July and September) were analyzed. The temporal and spatial distribution characteristics of the samples taken from 27 groundwater wells in 2003 and 2008 were studied. In 2003 before summer irrigation, the area with the nitrate nitrogen concentration of groundwater larger than 10 mg/L for the Jiefangzha irrigation area accounted for 9.95% of the total irrigation one, and that with the annual average nitrate nitrogen concentration higher than 10 mg/L accounted for 9.02% of the total irrigation one. In March of 2008, the area with the nitrate nitrogen concentration of groundwater larger than 10 mg/L was 5.22% of the total irrigation one, and that with the annual average nitrate nitrogen concentration higher than 10 mg/L was 5.20% of the total irrigation one. The monitoring results and temporal and spatial distribution trend from 2003 to 2008 indicate that there is severe nitrogen pollution of the groundwater in the study area, however, the implementation of water-saving irrigation projects and measures has positive roles in reducing the loss of fertilizer leaching and the pollution of groundwater. Especially the reduction of autumn irrigation amount and the decrease of groundwater level both have remarkable function in the reduction of nitrate nitrogen leaching and pollution of groundwater.

Key words: Hetao irrigation district; water-saving irrigation; nitrate nitrogen; temporal and spatial change

中国水污染的核心问题是水体的氮、磷富营养化,大部分水体污染的主要原因是农业面源污染^[1]。河套灌区是中国三大灌区之一,土壤盐碱化严重。由于灌区长期形成大水漫灌的习惯,加上大量使用化学氮肥,导致大量的氮肥损失,尤其是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失导致的地下水面源污染特别严重^[2]。虽然关于河套灌区农田氮淋失状况也有一些较为深入的研究^[2-6],但这些研究主要集中在小区试验监测,对农田灌溉引起水体氮污染的时空变化趋势研究较少。特别是随着河套灌区近几年来节水工程的实施和引黄水量的控制,以及灌区管理水平的提高,对于灌区节水工程改造及灌区引水量下降对区域地下水氮肥淋失造成地下水污染的影响研究显得较为薄弱。硝态氮是旱地农田土壤无机氮存在的主要形态^[6],在农田施入的氮素除被作物吸收外,一部分以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的形式储存于土壤中,在降雨或灌溉时淋至土壤深层,导致地下水污染。其污染方式大致有2种:一种是点源污染,另一种是面源污染。点源污染已经有了定论,面源污染问题仍处于争论之中。近年来,国内外开展了许多农田硝态氮淋失的研究工作^[7-11],这些工作着重于对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失的环境影响评价,或者对氮肥施入土壤后的转化过程研究和肥料利用率的计算,或者针对水氮耦合的运移进行模拟。对于河套灌区农田氮素淋失引起的硝态氮地下水污染状况的研究,笔者曾经在2003年对其进行了污染状况评价,该评价只采用了2003年的实验数据,仅仅从污染程度上进行了总体评价,没有对空间污染状况进行分析,也没有在时间变化趋势上做进一步的跟踪监测。2003年以来,河套灌区连续投入大量资金进行了节水工程改造,解放闸灌域的干渠、分干渠及支斗渠都不同程度地进行了节水工程配套,节水工程覆盖率已经达到灌区的40%左右,灌区的引水量也较多年平均值有明显减少,地下水位也呈下降趋势,评价灌区节水改造后区域农田氮污染状况对于评价节水工程的环境、生态效益具有十分重要的意义。在2003年监测结果的基础上,笔者于2008年对灌区的地下水污染状况进行取样分析,并应用ArcGIS软件分析了不同年份相同时期灌域内农田硝态氮淋失空间变化以及分布状况,以期为该地区水环境的保护、治理及节水工程改造后的环境效应评价提供参考依据。

1 试验方法

1.1 研究区基本情况

河套灌区解放闸灌域位于河套灌区上游,南北长约87 km,东西宽约78 km,呈三角形,地形是西

南高、东北低,海拔高度为1032~1035 m。灌域总面积为 $2.304 \times 10^5 \text{ hm}^2$,灌溉面积为 $1.421 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中耕地为 $1.22 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。灌域属中温带高原气候型、大陆性气候特征。风大雨少,气候干燥,蒸发量大,无霜期短,日照时间长,年均日照时数为3181 h,多年平均无霜期为130 d。灌域多年平均地下水埋深1.72 m,年平均降水138.2 mm,年平均蒸发量为2096.4 mm,年平均风速为2~3 m/s,是典型的无灌溉即无农业的地区,多年平均引水量在13亿 m^3 左右,多年平均排水量在2亿 m^3 左右。灌域内设有地下水日常观测井57眼,其中有27眼同步观测地下水水质。灌域内有干渠3条、分干渠16条,全长263 km。从2000年开始,河套灌区陆续开始实行大型灌区节水工程改造,减少引黄水量,推行节水灌溉制度等措施,灌区农田水环境因此发生了一系列的变化,笔者把这个变化阶段前后人为地定义为节水工程实施前后。

1.2 试验内容与测定方法

地下水采样点为解放闸灌域的27眼地下水井,测点遍布整个灌域,基本属于平均分布。采样时间分别为2003年的3月、5月、7月、9月与2008年的3月、5月、7月、9月,采样点位置均用GPS定位,取回的水样用密封袋密封保存于冰箱内,并在24 h内将取得的样品测定完毕。水样测定内容为硝态氮质量浓度,测定方法为紫外分光光度法。地下水矿化度测定方法为质量法。解放闸灌域地下水水质监测点分布见图1。

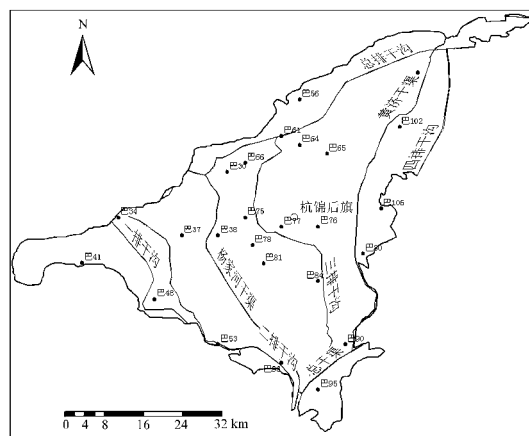


图1 解放闸灌域地下水水质监测点分布

1.3 反距离加权插值方法

根据解放闸灌域27个地下水井点测得的数据进行空间插值,获得不同年份相同时期的地下水硝态氮浓度空间分布情况。文中所用的反距离加权(IDW, inverse distance weighted)插值法是近年来广泛应用于空间插值的一种方法^[12],该方法基于相近似的原理,物体离得越近,它们的性质就越相似;反之,

离得越远则相似性越小。该方法以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大。该方法可由 ARCGIS9.0 中的插值工具模块实现。

反距离加权插值法的一般公式为

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \tag{1}$$

式中: $\hat{Z}(s_0)$ 为 s_0 处的预测值; N 为预测计算过程中要使用的预测点周围样点的数量; λ_i 为预测计算过程中使用的各样点的权重,其值随着样点与预测点之间距离的增加而减少; $Z(s_i)$ 为 s_i 处获得的测量值。

确定权重的计算公式为

$$\lambda_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \tag{2}$$

式中: p 为指数值; d_{i0} 为预测点 s_0 与各已知样点 s_i 之间的距离。

样点在预测点值的计算过程中所占权重的大小受参数 p 的影响,也就是说,随着采样点与预测点之间距离的增加,标准样点对预测点影响的权重按指数规律减少。在预测过程中,各样点值对预测点值作用的权重大小是成比例的,这些权重值的总和为1。

2 结果与讨论

2.1 节水灌溉前后引水量变化对比分析

由于硝态氮的淋洗与灌水量密切相关,通过2002年、2003年、2007与2008年解放闸灌域的引水量(表1)可以看出,2002~2008年间,引水量呈整体减小趋势,2008年的全年灌水量比2002年减少9%,说明节水改造项目实施后灌区节水效果较为明显。

表1 河套灌区解放闸灌域

节水灌溉前后引水量对照			万 m ³
年份	夏秋灌水量	秋浇水量	全年浇灌水量
2002	89 525	34 940	124 465
2003	67 624	35 883	103 507
2007	80 862	31 462	112 324
2008	77 152	35 394	112 546

2.2 节水灌溉前后地下水埋深及其水质变化分析

2.2.1 地下水埋深变化

河套灌区的地下水埋深与引水量有密切关系,长期以来由于过量引水,灌区地下水埋深一直处于较高水平,导致灌区盐渍化问题较为突出。随着节水改造工程的实施和节水灌溉技术的推广,灌区内年引水量逐年减少,地下水位也随之有了明显的下降,由表2可以看出地下水埋深由2002年年均1.64 m下降到2008年的1.99 m,地下水位平均下降了0.35 m,比多年平均地下水位(1998~2008年)下

降了0.14 m。在作物生育期内地下水埋深也有了不同程度的下降,表明河套灌区节水工程实施后,由于引水量减少,降低了地下水位,对于控制灌区土壤盐渍化起到了积极作用。

表2 河套灌区解放闸灌域节水灌溉前后

地下水位变化对照							m
年份	1月	3月	5月	7月	9月	10月	平均值
2002	1.98	2.20	1.21	1.43	1.97	1.40	1.64
2003	2.04	2.34	1.55	1.90	2.23	1.47	1.88
2007	2.25	2.41	1.75	1.79	2.29	1.47	1.94
2008	2.17	2.56	1.68	1.99	2.37	1.55	1.99

2.2.2 地下水矿化度变化

地下水矿化度是衡量地下水水质的一项重要指标。河套灌区地下水矿化度大于3 000 mg/L的面积几乎布满了整个灌域,通过节水前后地下水水质的对比发现,灌区地下水水质呈现好转趋势。从表3中可以看出,2008年地下水矿化度较2003年平均降低了21.4%。河套灌区的浅层地下水基本上是农田灌溉经由土壤耕作层下渗到地下水表层。灌区土壤盐渍化程度高,土壤中的盐分由于灌溉被淋洗到地下水表层。节水改造工程使得灌区引水量减少,地下水矿化度降低,关于此需要进一步深入研究。

表3 河套灌区解放闸灌域节水灌溉前后

地下水水质矿化度变化对照							mg/L
年份	1月	3月	5月	7月	9月	10月	平均值
2002	5 271	5 767	5 897	5 214	5 216	4 371	5 290
2003	4 550	4 428	4 377	4 848	5 619	5 070	4 816
2007	4 013	6 789	4 395	3 797	4 856	4 801	4 775
2008	4 101	4 556	3 959	4 918	4 311	3 111	4 159

2.3 区域硝态氮时空变化分析

利用反距离加权法,对2003年和2008年的硝态氮监测结果进行空间插值分析,并将不同浓度硝态氮所占的面积进行对比分析,从图2及表4可以看出,在2003年间,夏灌前解放闸灌域地下水硝态氮质量浓度大于10 mg/L的面积占灌域总面积的9.95%,全年所测得的4次硝态氮质量浓度总平均值大于10 mg/L的面积占灌域总面积的9.02%;2008年3月硝态氮质量浓度大于10 mg/L的面积占灌域总面积的5.22%,全年平均值大于10 mg/L的面积占灌域总面积的5.20%。而2003年与2008年所测得的硝态氮质量浓度大于10 mg/L的面积占灌域总面积的比例均超过5%,由此可以看出,解放闸从2003年到2008年地下水重度污染的面积大幅度减少,虽然河套灌区解放闸灌域近些年地下水的硝态氮污染不容乐观,但是随着节水工程的实施及引水量的减少,加之灌区管理水平的提高,灌域内地下

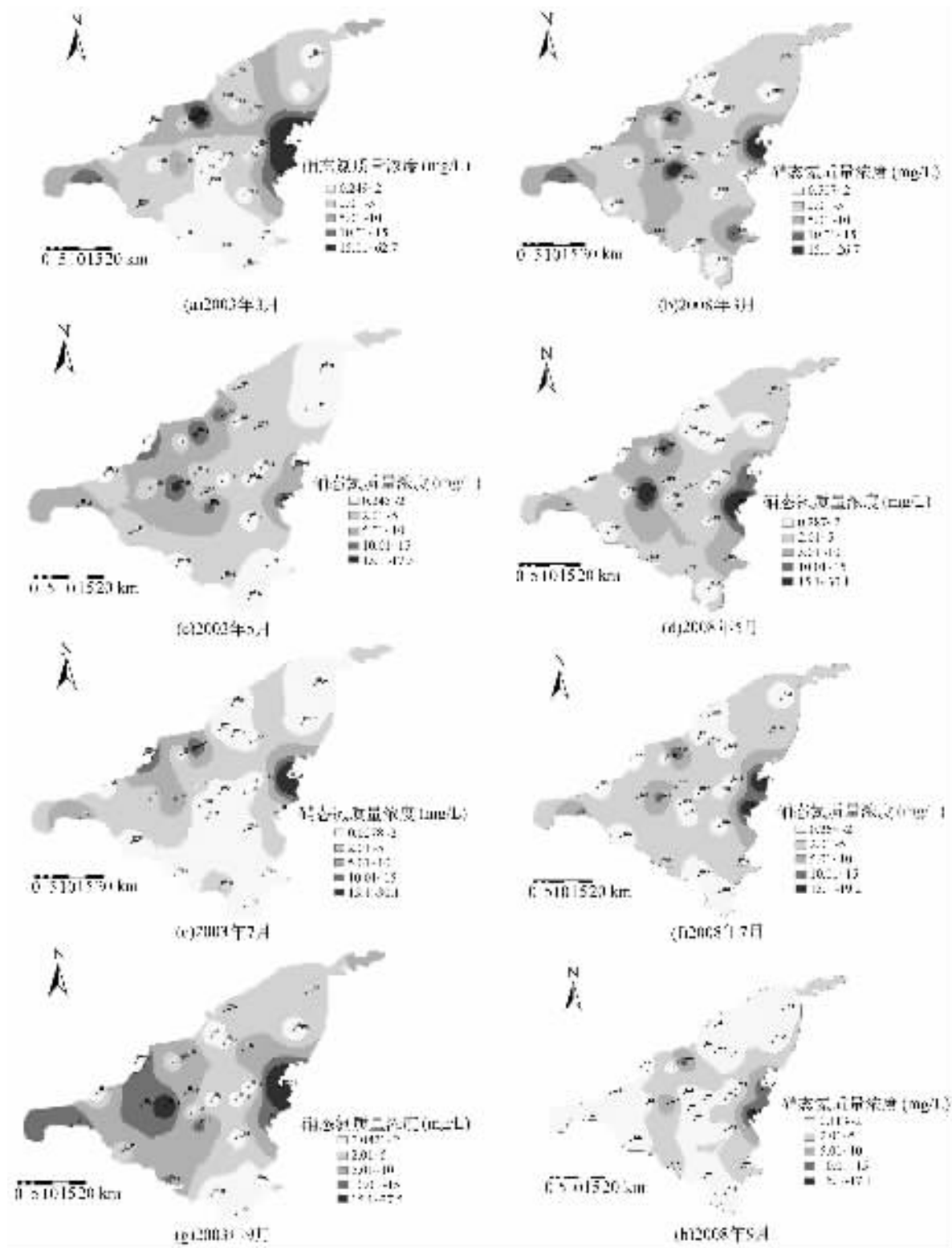


图2 河套灌区解放闸灌域节水灌溉前后地下水硝态氮时空分布

水硝态氮污染状况有较为明显的缓解,说明实行节水工程改造和节水灌溉对于改善河套灌区水环境状况具有积极的作用。

4 结 论

通过对河套灌区解放闸灌域节水工程实施前后的区域地下水硝态氮污染的监测和时空分布分析评

价,得出以下主要结论:

a. 近年来节水工程改造及引黄水量的减少导致地下水位下降,对控制土壤盐渍化有明显作用。地下水矿化度有所下降,但难以进行机理解释,需要进一步深入研究。

b. 节水灌溉工程实施几年内,灌区硝态氮淋失得到缓解,地下水硝态氮质量浓度总体呈下降趋势,

表 4 不同年份相同时期解放闸灌域不同质量浓度硝态氮所占面积对比

日期	硝态氮质量浓度小于 2 mg/L		硝态氮质量浓度为 2~5 mg/L		硝态氮质量浓度为 5~10 mg/L		硝态氮质量浓度大于 10 mg/L	
	灌域面积/ hm ²	灌域面积占 总面积比例/%	灌域面积/ hm ²	灌域面积占 总面积比例/%	灌域面积/ hm ²	灌域面积占 总面积比例/%	灌域面积/ hm ²	灌域面积占 总面积比例/%
2003-03	65 286.67	28.33	89 653.33	38.91	52 573.33	22.81	22 920.00	9.95
2008-03	31 853.33	13.82	135 246.67	58.69	51 300.00	22.26	12 040.00	5.22
2003-05	48 126.67	20.88	111 033.33	48.18	61 760.00	26.80	9 520.00	4.13
2008-05	37 766.67	16.39	120 860.00	52.45	54 666.67	23.72	17 146.67	7.44
2003-07	109 753.33	47.63	83 606.67	36.28	28 166.67	12.22	8 920.00	3.87
2008-07	49 580.00	21.52	145 486.67	63.13	25 680.00	11.14	9 693.33	4.21
2003-09	33 166.67	14.39	83 306.67	36.15	72 180.00	31.32	41 793.33	18.14
2008-09	135 993.33	59.01	71 160.00	30.88	14 240.00	6.18	9 046.67	3.93

注 灌域总面积为 230 440.00 hm²。

地下水污染状况呈现减轻趋势。节水灌溉的实施对减少河套灌区的硝态氮淋失和地下水污染具有积极的改善作用,特别是由于秋浇水量的减少,地下水对硝态氮淋失污染具有明显的作用,随着人们节水意识的增强,加之科学的施肥,未来河套灌区的硝态氮淋失污染问题有望得到控制。

c. 节水灌溉工程实施后,对灌区地下水环境的影响是直接的、明显的,但作为农业生产基础载体的土壤地下水环境变化,是受多种因素综合影响的。除一定生产力条件下的人为因素外,土地类型、地形地貌及不同水文年型的气象等自然因素,无不对地下水环境产生影响。因此,较长时间系列的研究节水灌溉实施引起的地下水硝态氮及杀虫剂、磷的污染状况变化,是今后研究需要继续关注的问题。

致谢:在项目实施过程中得到了河套灌区沙壕渠灌溉试验站有关人员的大力支持,在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] 雷能忠,黄大鹏.基于 GIS 的农业面源污染风险评估[J].中国农学通报,2007,23(12):381-385.

[2] 冯兆忠,王效科,冯宗炜,等.内蒙古河套灌区秋浇对不同灌季土壤盐分淋失的影响[J].农村生态环境,2003,19(3):31-34.

[3] 冯兆忠,王效科,冯宗炜,等.河套灌区秋浇对农田土壤氮素及盐分淋失对地下水的影响[J].农村水资源,2005,71(2):131-143.

[4] 郝芳华,欧阳威,李鹏,等.河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析[J].环境科学学报,2008,28(5):845-852.

[5] FENG Zhao-zhong, WANG Xiao-ke, FENG Zong-wei. Soil N and salinity leaching after autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District[J]. Agriculture Water Management, 2005, 71: 131-143.

[6] 冯兆忠,王效科,冯宗炜,等.河套灌区地下水氮污染状况[J].农村生态环境,2005,21(4):74-76.

[7] 刘英华,张世熔,张素兰,等.成都平原地下水硝酸盐含量空间变异研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(1):114-117.

[8] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京市农田土壤硝态氮的累积特征[J].中国农业科学,2004,37(5):692-698.

[9] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等.北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J].土壤学报,2006,43(3):405-413.

[10] 曹娜,张乃明.滇池周边地区农田土壤硝酸盐迁移累积特征[J].安全与环境学报,2007,17(1):20-22.

[11] 曹红霞,康绍忠,何华.田间管理措施对土壤硝态氮迁移影响研究进展[J].灌溉排水学报,2005,24(1):72-76.

[12] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.反距离加权插值法在污染场地评价中的应用[J].应用生态学报,2007,18(9):2013-2018.

[13] 刘宏斌,雷宝坤,张云贵,等.北京市顺义区地下水硝态氮污染的现状与评价[J].植物营养与肥料学报,2001,7(4):385-390.

[14] 姜爱霞.水环境氮污染的机理及防治对策[J].中国人口资源与环境,2000(10):75-76.

[15] 陈效民,邓建才,柯用春,等.硝态氮垂直迁移过程中的影响因素研究[J].水土保持学报,2003,17(2):12-15.

[16] 唐小娟,刘佳莉.成功度法在甘肃省节水灌溉技术影响后评价中的应用[J].水利经济,2009,27(5):51-53.

[17] 王莉莉,徐得潜,许一,等.安徽省节水灌溉工程管理模式研究[J].水利经济,2008,26(6):61-63.

[18] 蔡守华,张展羽.节水灌溉发展现状与管理模式研究综述[J].水利经济,2007,25(4):38-40.

(收稿日期 2009-06-17 编辑:高建群)

