

河岸带地下水营养元素和有机质变化及与洪水的响应关系研究

徐华山^{1,2}, 赵同谦^{2*}, 孟红旗^{2,3}, 徐宗学¹, 马朝红⁴

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 4. 河南黄河湿地国家级自然保护区孟津管理局, 孟津 471100)

摘要: 河岸带地下水和河水存在复杂的交互作用, 地下水和地表水存在明显的补排关系, 洪水事件是影响河岸带地下水水质波动的重要水文过程。以黄河湿地国家级自然保护区孟津湿地为研究对象, 通过河岸带地下水营养元素指标 (特别是小浪底水库调水调沙期间) 野外定位观测, 深入分析了河岸带地下水水质变化及其与洪水的响应关系。结果表明, 河岸滩区的农业开发存在明显的氮、磷下渗流失风险。临近河岸的农耕旱作区, 是河流与人工湿地之间一个特殊的氮污染物控制单元, 对地下水和河流之间的氮迁移隔离起着极为重要的作用。在人工湿地, 农家粪作为底肥加入可能是磷下渗流失的重要源头, 进入地下水中的磷顺着水力坡度还发生着显著的横向迁移, 尤其在调水期横向迁移更加明显。河岸滩区的开发类型及其耕作制度对地下水的硝氮含量产生重要的影响。在鱼塘区, 常年的土壤厌氧环境加重了氮的下渗迁移和积累; 在荷塘区, 春夏季节, 土壤淹没呈厌氧环境, 氮迁移和硝化作用显著, 在秋冬季节, 土壤呈好氧环境, 氮硝化作用显著发生, 全年氮达到相对平衡的状态; 距离河岸 50 ~ 200 m 之间氮的硝化-反硝化作用强烈, 是一个高效的微生物氮净化单元。人工湿地施用的农家粪是有机物流失的重要源头, 河岸滩区土壤质地呈沙性, 渗透能力强, 土壤保水保肥能力差, 在此区进行农业活动, 尤其是人工湿地开发中大量施用肥料, 容易造成土壤表层有机质和氮磷养分因灌溉而导致的下渗流失, 进而污染地下水与河水, 较由降雨引起的地表径流流失显得更为突出。距离河道 50 ~ 200 m 的范围是重要的污染净化单元, 为典型的滩区地下水-河流的水陆交错带。该区域的合理保护, 对于保护河流水质和地下水水质十分重要。

关键词: 河岸带; 地下水水质; 营养元素; 有机质; 洪水; 响应关系

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301 (2011) 04-0955-08

Relationship Between Groundwater Quality Index of Nutrition Element and Organic Matter in Riparian Zone and Water Quality in River

XU Hua-shan^{1,2}, ZHAO Tong-qian², MENG Hong-qi^{2,3}, XU Zong-xue¹, MA Chao-hong⁴

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture & Forest University, Yangling 712100, China; 4. Mengjin Administration of the Yellow River National Natural Wetland Reserve, Henan Province, Mengjin 471100, China)

Abstract: Riparian zone hydrology is dominated by shallow groundwater with complex interactions between groundwater and surface water. There are obvious relations of discharge and recharge between groundwater and surface water. Flood is an important hydrological incident that affects groundwater quality in riparian zone. By observing variations of physical and chemical groundwater indicators in riparian zone at the Kouma section of the Yellow River Wetland, especially those took place in the period of regulation for water and sediment at the Xiaolangdi Reservoir, relationship between the groundwater quality in riparian zone and the flood water quality in the river is studied. Results show that there will be great risk of nitrogen, phosphorus, nitrate nitrogen and organic matter permeating into the groundwater if floodplain changes into farmland. As the special control unit of nitrogen pollution between rivers and artificial wetlands, dry farming areas near the river play a very important role in nitrogen migration between river and groundwater. Farm manure as base fertilizer may be an important source of phosphorus leak and loss at the artificial wetlands. Phosphorus leaks into the groundwater and is transferred along the hydraulic gradient, especially during the period of regulation for water and sediment at the Xiaolangdi Reservoir. The land use types and farming systems of the riparian floodplain have a major impact on the nitrate nitrogen contents of the groundwater. Nitrogen can infiltrate and accumulate quickly at anaerobic conditions in the fish pond area, and the annual nitrogen achieves a relatively balanced state in lotus area. In those areas, the soil is flooded and at anaerobic condition in spring

收稿日期: 2010-03-05; 修订日期: 2010-07-19

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-09-0120); 中国科学院城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目 (SKLURE2010-2-4); 国家自然科学基金项目 (30570276); 河南省教育厅自然科学研究计划项目 (2010B610006)

作者简介: 徐华山 (1977 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为河流湿地生态系统, E-mail: xuhuashan@hpu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhaotq@hpu.edu.cn

and summer, nitrogen infiltrates and denitrification significantly, but soil is not flooded and at aerobic condition in the autumn and winter, and during these time, a significant nitrogen nitrification process occurs. In the area between 50 m and 200 m from the river bank, which is the efficient microbial nitrogen purification unit, nitrification-denitrification is intensive. Farm manure is an important source of organic matter loss at the artificial wetlands. Floodplain has sandy soil texture, with high infiltration capacity and low water and fertilizer conservation ability. Such features are prone for the loss of surface soil nutrition and organic matter if agricultural activities taken place in these areas change the land use of wetlands and apply extensive fertilizer. The infiltrated nutrition elements and organic matter can pollute the groundwater and the river. Compared with the losses of nutrition element and organic matter caused by surface runoff, the infiltrated process is even more prominent. As typical floodplain groundwater-river ecotone, the area between 50m and 200m from the river bank is a momentous pollution purification unit. Rational protection for this region is critical for the conservation of water quality in the river and groundwater.

Key words: riparian zone; groundwater quality; nutrition element; organic matter; flood; relationship

河岸带地下水和河水存在复杂的交互作用^[1~4]. 洪水季节,河岸带部分被淹没或地下水水位上升;平水、枯水季节,河岸带地下水补给河水. 对于季节性积水的湿地(尤其是河岸带湿地),地下水和地表水存在明显的补排关系,地下水和河水由于其强烈的交互作用^[5~7],地下水水质也受到影响^[4]. 国外有学者研究过海狸筑坝对河岸带地下水的影响^[8,9],地下水硝酸盐氮源解析^[10]、地下水流和盐度输移受潮汐的影响^[11]. 国内学者则对湿地水文过程研究热点做了归纳总结^[12~15],已有研究集中在水库建设对库区^[16]、坝址下游^[17~19]湿地水文过程的影响、气候变化对湿地水文过程的影响^[20, 21]、湿地地表水与浅层地下水联系^[22]、河岸带受河道水位变化影响下的水文过程^[23]、湿地蓄水与调洪功能^[24]、湿地系统景观格局与水文过程耦合机制^[25]、河岸带地下水平衡分析^[26]以及土壤氮素对湿地水文响应^[27]等方面.

本研究针对以上问题,结合黄河河岸带地下水营养元素含量的实际观测,特别是小浪底水库调水调沙期间地下水营养元素含量变化,获得湿地与河流之间补排关系的重要实证. 重点研究了以下问题:①洪水事件引起地下水营养元素含量变化;②洪水事件对地下水水质影响范围;③河岸滩区的农业生产污染物通过地下渗流迁移到地下水的可能性及程度. 有关结论可以为河岸带生态重建工作提供基础数据和科学依据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

实验区位于黄河中游河南孟津县东北部的黄河湿地国家级自然保护区,位于小浪底水利枢纽下游约 40 km 处. 地理坐标在北纬 34°47′~34°53′,东经 112°29′~112°49′之间,海拔高度为 120~130 m. 本区属亚热带和温带的过渡地带,季风环流影响明显,年平均气温为 13.7℃,年平均降水量为 650.2 mm,年平均蒸发量为 1 796.6 mm. 随着小浪底水库的修建,季节性洪水得到有效控制,滩地受到高强度的开发利用,大面积自然湿地转变为鱼塘(8.5%)、荷塘(16.3%)、水稻田(8.9%)、农耕旱地(36.1%),剩下的约 30% 河床湿地及水面也受到农业活动的影响而发生着严重的功能退化. 研究区植被以湿生及湿生-陆生过渡类型草本植物为主,夏秋季节覆盖度高,冬春受火烧、刈割、放牧等人为影响,植被稀疏、沙土裸露^[28].

1.2 实验设计

在垂直于河岸的河滩上,远离河床依次开凿 7 口地下水观测井,距河床距离及井口标高如表 1 所示,2007 年 4 月增加 7 号井,距离河岸 650 m. 观测井采用 PVC 管,直径 1.85 cm,管下部 0.8 m 开 3 排间距为 10 cm,孔径 1 cm 的入水孔,并用过滤纱网包裹,井管周围用细砂填充.

表 1 地下水观测井布置及高程情况
Table 1 Location and elevation of groundwater monitoring wells

观测井	距河床距离/m	井深/m	井口标高/m	地表植被描述
1 号	0	3.5	109.64	河床湿地、柳树林
2 号	25	6.0	112.29	速生杨树林 ¹⁾
3 号	50	7.0	112.43	农业旱地(小麦-棉花)
4 号	100	7.0	113.00	农业旱地(小麦-大豆)
5 号	200	7.5	112.96	农业旱地(小麦-大豆) ²⁾
6 号	400	8.0	112.94	人工湿地(荷塘)
7 号	650	8.0	113.29	人工湿地(荷塘)

1) 2008 年速生杨树林改为旱地; 2) 2008 年农业旱地改成荷塘

1.3 采样频率

在平水、枯水期地下水采样周期为 1 次/30 d; 在小浪底调水调沙期间(每年的 6 月中下旬到 7 月初,持续约 10 ~ 15 d,洪峰流量 3 500 ~ 4 300 m³/s,实验期 2006 ~ 2008 年调水调沙时间分别为 06-15 ~ 07-03、06-19 ~ 07-07、06-19 ~ 07-03) 由于水质变化波动幅度大,调水期间及调水后观测期水质监测采取每 2 ~ 3 d 1 次. 监测指标包括总氮、总磷、硝酸盐氮. 水样采集后加酸调节 pH < 2.0 低温保存,带回实验室,用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后按照国标 A 类方法测量. 实验仪器包括:高压灭菌锅、1801 紫外-可见分光光度计、水浴锅.

2 结果与分析

2.1 地下水总氮变化特征分析

2.1.1 时间变化趋势

观测期内各水井总氮变化情况如图 1 所示. 从

全年的变化趋势看,河水与地下水在 3 个时间段内形成总氮的观测峰值:荷塘蓄水初期、调水调沙期和 10 月中下旬. 4 月份荷塘蓄水初期,水温相对偏低,土壤中的微生物活性最低,农作物进入青苗的快速生长期,需要大量的氮磷营养物质,但是地下水总氮却出现峰值,其主要原因可能是荷塘蓄水初期,荷塘底肥结合水力下渗作用,使荷塘表层土壤中的氮迅速迁移进入地下水;调水调沙期,河水与地下水的总氮波动最大,并在调水中后期达到峰值,地下水水位的升高使地下水直接与湿地表层土壤接触,其中丰富的营养物质就可以直接迁移进入地下水,同时随着地下水水温的升高,土壤中的微生物活性逐渐升高,在物理迁移和微生物转化的共同作用下,地下水总氮达到最大;观测期数据显示,10 月中下旬地下水水温达到最大,土壤中微生物活性达到最大,植被氮吸收能力减弱,因此地下水总氮出现一个生物峰值.

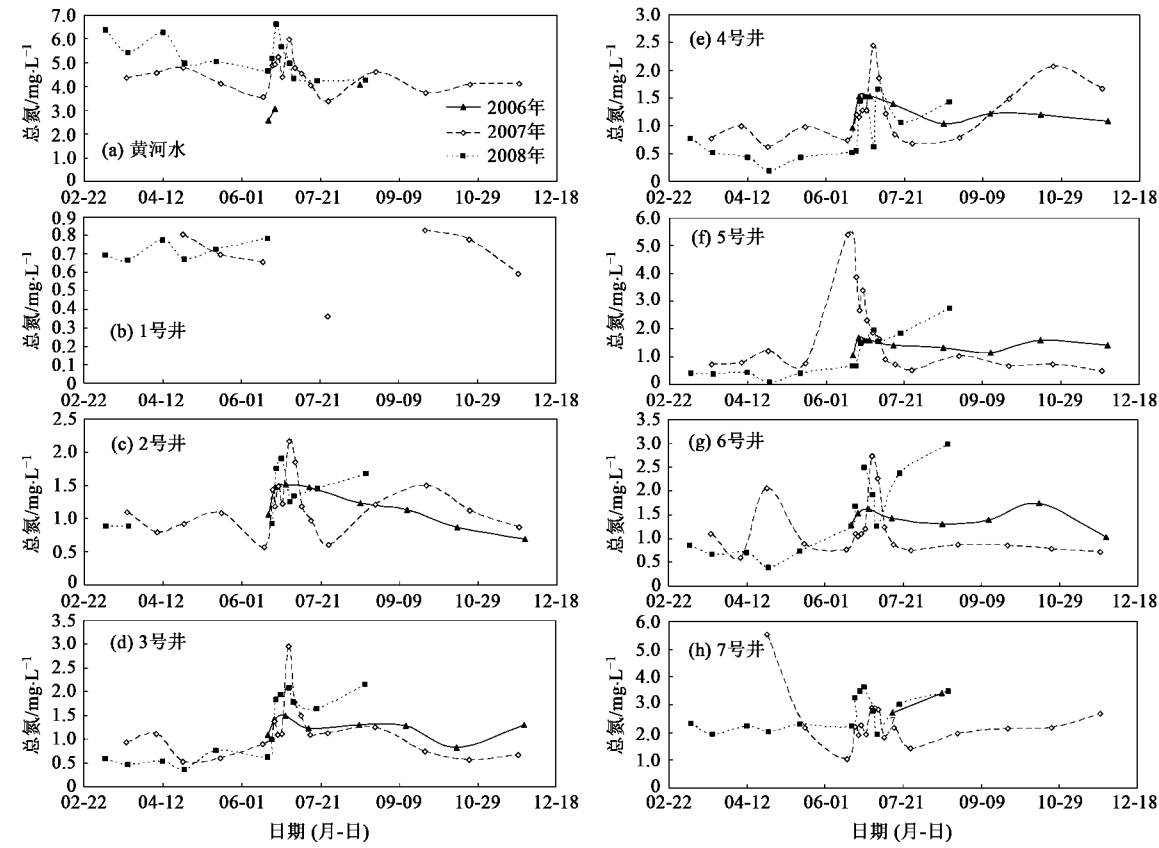


图 1 河岸带地下水观测井总氮变化趋势
Fig.1 Changes of groundwater total nitrogen in riparian zone

2.1.2 空间差异性

黄河水总氮一般为 3 ~ 7 mg/L,在河岸带的旱地地下水总氮一般为 0.5 ~ 1.5 mg/L,荷塘地下水

总氮一般为 1 ~ 2 mg/L,在荷塘上游的鱼塘附近的民用井水总氮一般为 4 ~ 8 mg/L. 结合图 2、图 3 可以认为,位于河流与人工湿地之间的河岸旱地是一

个特殊的污染物控制单元,对地下水和河流之间的氮迁移起着极为重要的作用.

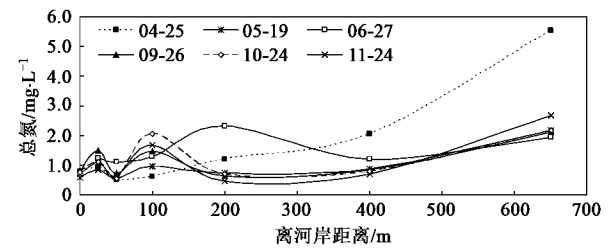


图2 河岸带地下水总氮空间差异性(2007年)
Fig.2 Spatial differences of groundwater total nitrogen in riparian zone (2007)

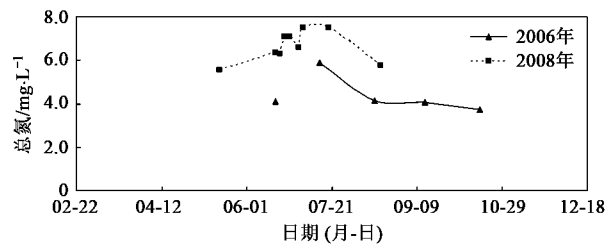
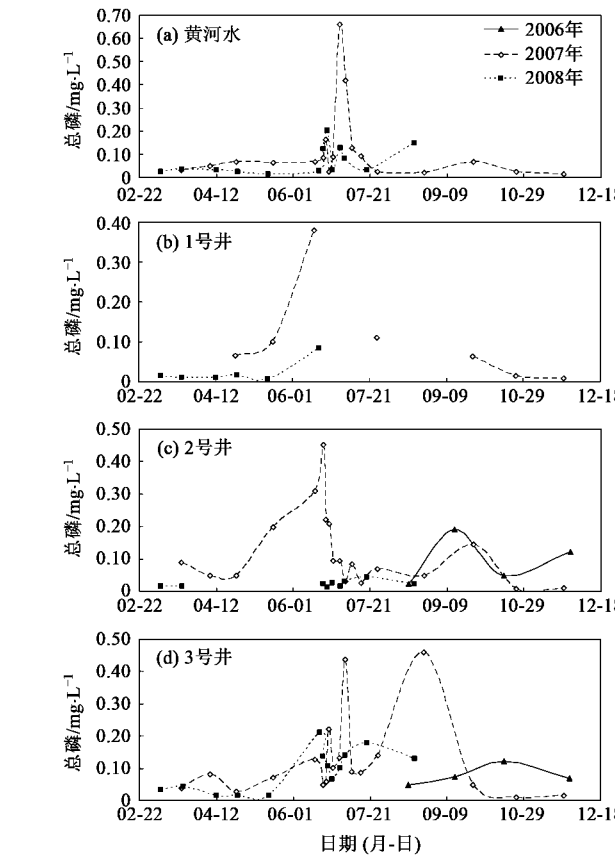


图3 河岸带鱼塘附近民用井水总氮含量
Fig.3 Content of total nitrogen of the groundwater near the fish pool in riparian



2.2 地下水总磷变化特征分析

2.2.1 时间变化趋势

观测期内各水井总磷变化情况如图4. 非调水调沙期间研究区黄河水一般较清澈,总磷含量0.01~0.05 mg/L,在调水期内,河水总磷含量明显升高,并在调水中后期达到峰值. 河岸带地下水总磷一般为0.01~0.1 mg/L,各水井之间并未发现峰值发生时间一致性的特点. 虽然调水期间也发生明显的波动,但地下水中磷的富集似乎发生在调水前的5~6月,如1号、2号、5号、7号井. 总磷的全年和调水期波动未发现年度间相似的空间规律性.

通常认为,磷在土壤中迁移的能力很小,一般通过表面径流以颗粒态或吸附态形式流失,因此平原区农田的磷流失问题一直未引起足够的重视. 有学者研究表明,农田中磷也会以某种方式进入地下水进而污染地下水^[29]. 通过对滩区农民的询问和取样时发现,位于荷塘的水井刚开始抽出的是“黑水”,并有臭味,以6~7月之间最为严重,这表明荷塘蓄水前投加的有机底肥部分已经迁入地下水表层. 因此滩区水田的耕作会加速磷元素向地下水的迁移. 但滩区旱地地下水的总磷含量也会产生峰

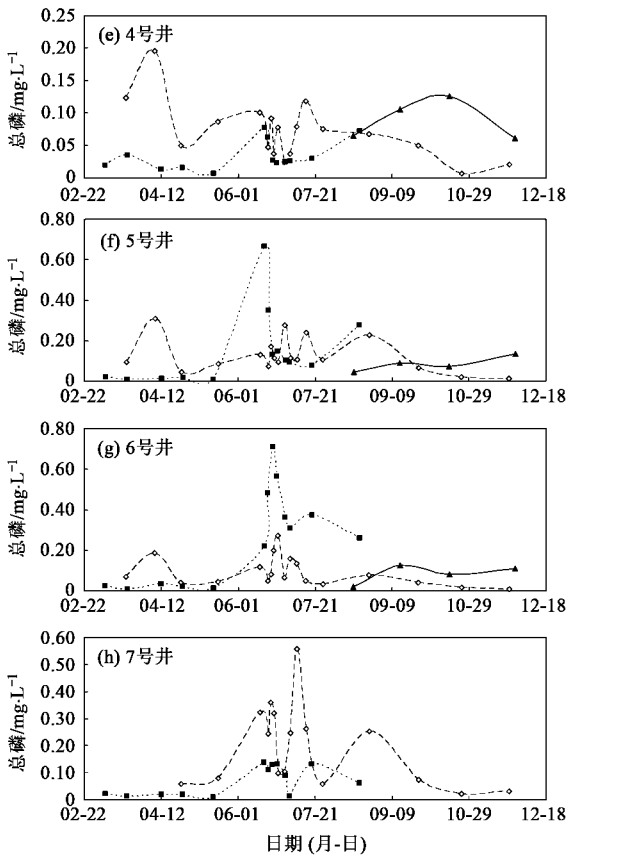


图4 河岸带地下水观测井总磷变化趋势
Fig.4 Changes of groundwater total phosphorus in riparian zone

值,这源于某种途径的垂直迁移或是外源的横向迁移过程,还需要进一步的实验室模拟研究。

2.2.2 空间差异性分析

图 5 显示了地下水总磷的空间差异性。

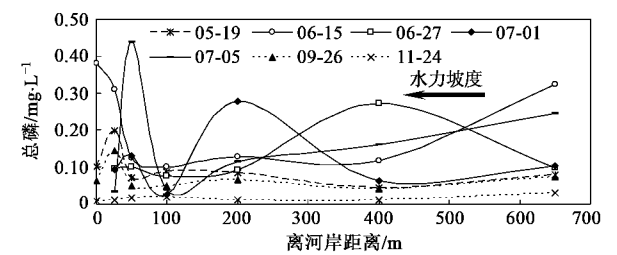


图 5 河岸带地下水总磷的空间差异性(2007 年)
Fig.5 Spatial differences of groundwater total phosphorus in riparian zone (2007)

2007 年调水期及后期的地下水总磷空间变化表明,地下水中磷元素的迁移存在着缓慢的随水力坡度向河流迁移的过程。荷塘在蓄水前投加的农家底肥可能是磷污染的主要来源。在沿河岸垂直的方向上,6 月 15 日之前,7 号井总磷达到最大;6 月 27 日,6 号井总磷达到最大;7 月 1 日,5 号井总磷达到

最大;7 月 5 日,3 号井总磷达到最大。这种总磷峰值依次交替出现的过程,是否能作为磷在地下水中迁移的一个重要论证,需要进一步探讨。磷在如此大尺度上的迁移过程还未见报道,但实验结果表明,河岸滩区的人工湿地是重要的磷元素污染源,不但能够通过水力下渗迁入地下水,并且能随着地下水水流发生横向迁移。造成这种结果的原因可能是调水调沙期间河水补给地下水,地下水位上升,潜水面达到上层土壤层,同时这段时间地下水和河水交互作用强烈,地下水在运动的过程中携带的细小颗粒物较多,磷附着在颗粒物上发生迁移。调水调沙期间地下水浊度变化上看出,初期地下水浊度有所降低,之后又逐渐回升,在退水初期,地下水浊度达到最大,这点反应了地下水中细小颗粒物较多,具体的原因尚需进一步的研究。

2.3 地下水硝酸根变化特征分析

2.3.1 时间变化趋势

河岸带地下水观测井硝酸根变化趋势见图 6。河水硝酸根浓度一般为 2 000 ~ 6 000 $\mu\text{g/L}$,在调水前的 1 月内达到全年最大值。湿地地下水通常

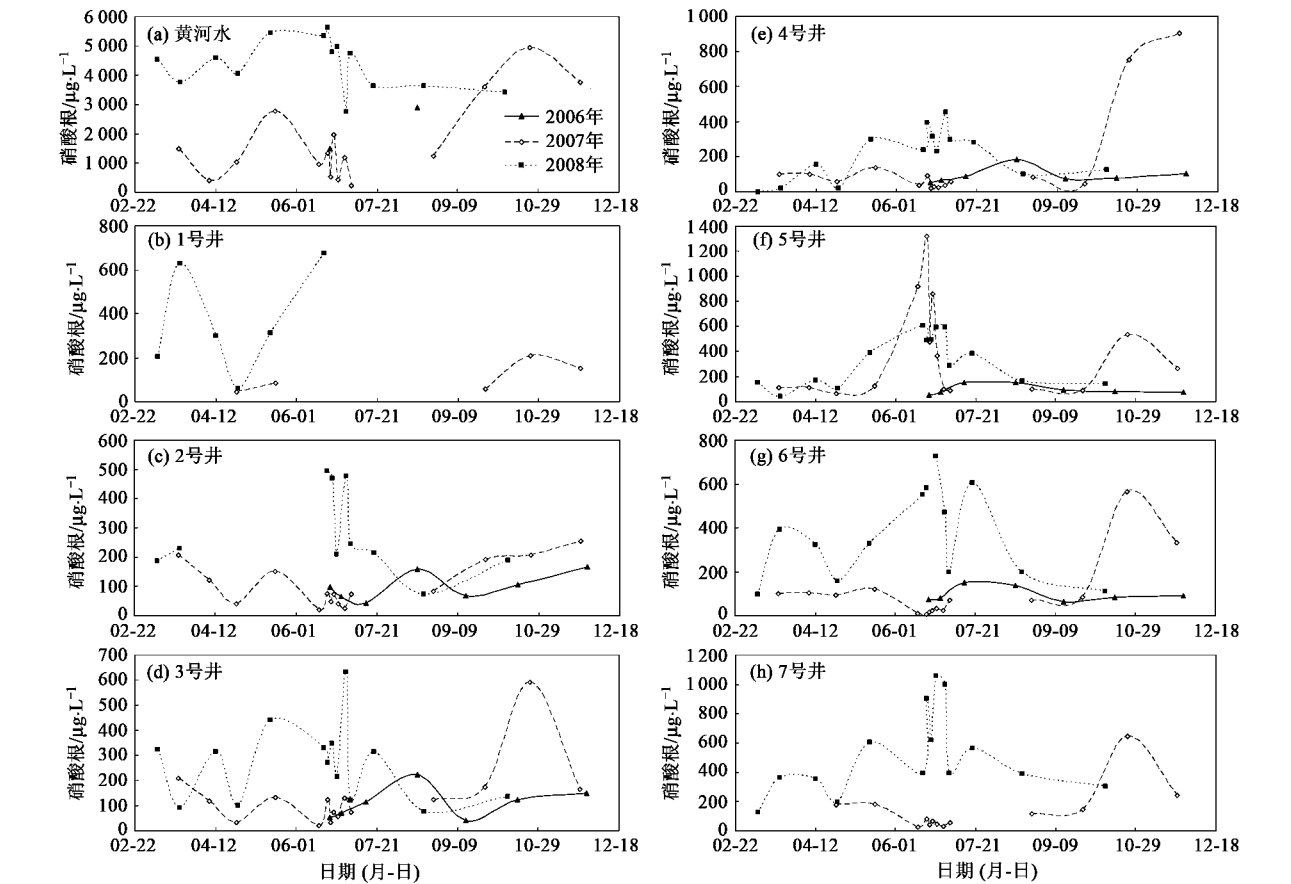


图 6 河岸带地下水观测井硝酸根变化趋势图
Fig.6 Changes of groundwater nitrate in riparian zone

$< 1\,000\ \mu\text{g/L}$, 通常整个汛期内, 硝氮浓度均有所偏高, 但 2007 年数据表明, 在秋季末 10 月底为全年的最高值. 在调水调沙期间, 各水井的硝氮出现明显的升高.

硝氮是总氮的重要组成部分, 在河水中, 硝氮占总氮的 80% 以上, 在河岸带地下水中, 硝氮占总氮的 40% 左右. 河岸区植物的吸收、土壤微生物的硝化/反硝化作用和下渗迁移是影响地下水中氮存在的重要因素, 3 个因素作用并不同步, 植物/农作物最大吸收发生在春季和夏季; 土壤微生物作用最大发生在秋季, 下渗迁移发生在春季. 因此, 春季人工湿地地下水中总氮偏高, 但硝氮比例较小, 随着土壤微生物的硝化/反硝化作用, 总氮中的有机氮逐渐被氧化降解成硝氮, 硝氮比例升高; 进入秋季, 植物吸收作用减弱, 土壤微生物作用达到最大, 硝氮比例有所升高, 占总氮的比例达到全年最大值.

2.3.2 空间差异性分析

在靠近河岸的区域 ($< 50\ \text{m}$), 由于湿地植物的提取和吸收, 地下水硝氮浓度偏低, 是河岸重要的植物氮吸收与净化区; 位于人工湿地边缘的 5 号井, 硝氮浓度年均波动大, 表明在低氧高碳的环境下, 硝氮来源充足, 反硝化细菌活性最大, 是一个重要反硝化发生区. 因此在人工湿地的周边地区, 由于人类农业活动的影响, 硝氮不断下渗进入地下水, 致使地下水硝氮不断升高, 如图 3 的鱼塘周边地下水中硝氮浓度达 $4 \sim 6\ \text{mg/L}$, 占总氮的比例超过 95%, 要防止其污染周边的地下水, 必须在人工湿地周边设置一个高效的硝氮净化区.

如图 7 所示, 在调水期, 荷塘地下水的硝氮浓度升高, 之后迅速下降; 11 月, 河岸 100 m 处硝氮浓度达到最大. 这种季节性的硝氮变化表明, 在河岸区 ($< 50\ \text{m}$), 湿地植物发育良好, 是重要的氮净化区; 河岸 50 ~ 200 m 范围内, 由于上游人工湿地的作用, 为氮的降解转化提供了有利条件, 使这一区域成为重要的反硝化发生区.

2.4 地下水高锰酸盐指数变化特征

2.4.1 时间变化趋势

各水井高锰酸盐指数变化趋势见图 8. 河水高锰酸盐指数一般为 $2.0 \sim 6\ \text{mg/L}$, 冬季枯水期、5 月和调水期出现 3 个明显的峰值, 这与河水总氮有相似之处; 最低值出现在调水期后至冬季的 3 ~ 4 个月内.

高锰酸盐指数大小表征的是水中有机质含量的高低, 在一定程度上表征水质的好坏. 河岸带地下

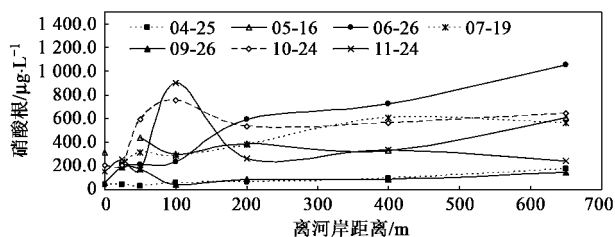


图 7 河岸带地下水硝酸根的空间差异性 (2007 年)

Fig. 7 Spatial differences of groundwater nitrate in riparian zone (2007)

水高锰酸盐指数一般为 $1.5 \sim 3.0\ \text{mg/L}$, 7 号井较其它井偏高 $1\ \text{mg/L}$. 位于旱地的 2 ~ 5 号井在调水前的 1 月内出现一个全年峰值, 水质最差, 掩盖了调水期内的微弱变化; 相反位于荷塘的 6、7 号井的全年峰值位于调水期内, 调水期内变化相对明显. 全年和调水期高锰酸盐指数变化幅度最大的均是 4 号井, 具体原因有待进一步研究.

2.4.2 空间差异性分析

河岸带地下水的高锰酸盐指数空间分布见图 9. 位于河流与人工湿地荷塘之间的农耕旱地, 地下水高锰酸盐指数变化最大, 在 2.3.1 节认为此段是一个特殊的污染控制单元, 结合前期进行的土壤渗透性实验, 表明在紧邻河岸的地区, 土壤孔隙率大, 质地呈沙性, 土壤保水保肥性差, 在此区进行农业活动更容易造成土壤表层有机质和养分的因灌溉而下渗流失, 进而污染地下水与河水. 因此建议研究区离河岸 50 ~ 200 m 之间的河岸区应减少人类农业活动, 保护地下水和河水水质.

3 结论

(1) 河岸带的农业开发存在明显的氮、磷下渗流失风险. 时间上, 地下水中的氮在荷塘蓄水初期、调水调沙期和 10 月中下旬存在 3 个峰值; 空间上, 离河岸最远的鱼塘氮渗漏最严重, 荷塘春季蓄水氮下渗严重, 年度内不存在明显氮积累现象; 临近河岸 50 ~ 200 m 的农耕旱作区, 氮下渗迁移的风险最小, 是河流与人工湿地之间一个特殊的氮污染物控制单元, 对地下水和河流之间的氮迁移隔离起着极为重要的作用. 农家粪施用是磷流失的重要源头, 在调水期, 磷随水力坡度的横向迁移显著增强.

(2) 河岸带的开发类型及其耕作制度对地下水中硝氮含量产生重要的影响: 在鱼塘区, 常年的土壤厌氧环境加重了氮的下渗迁移和积累; 在荷塘区, 春夏季节, 土壤淹没呈厌氧环境, 氮迁移和硝化作用显

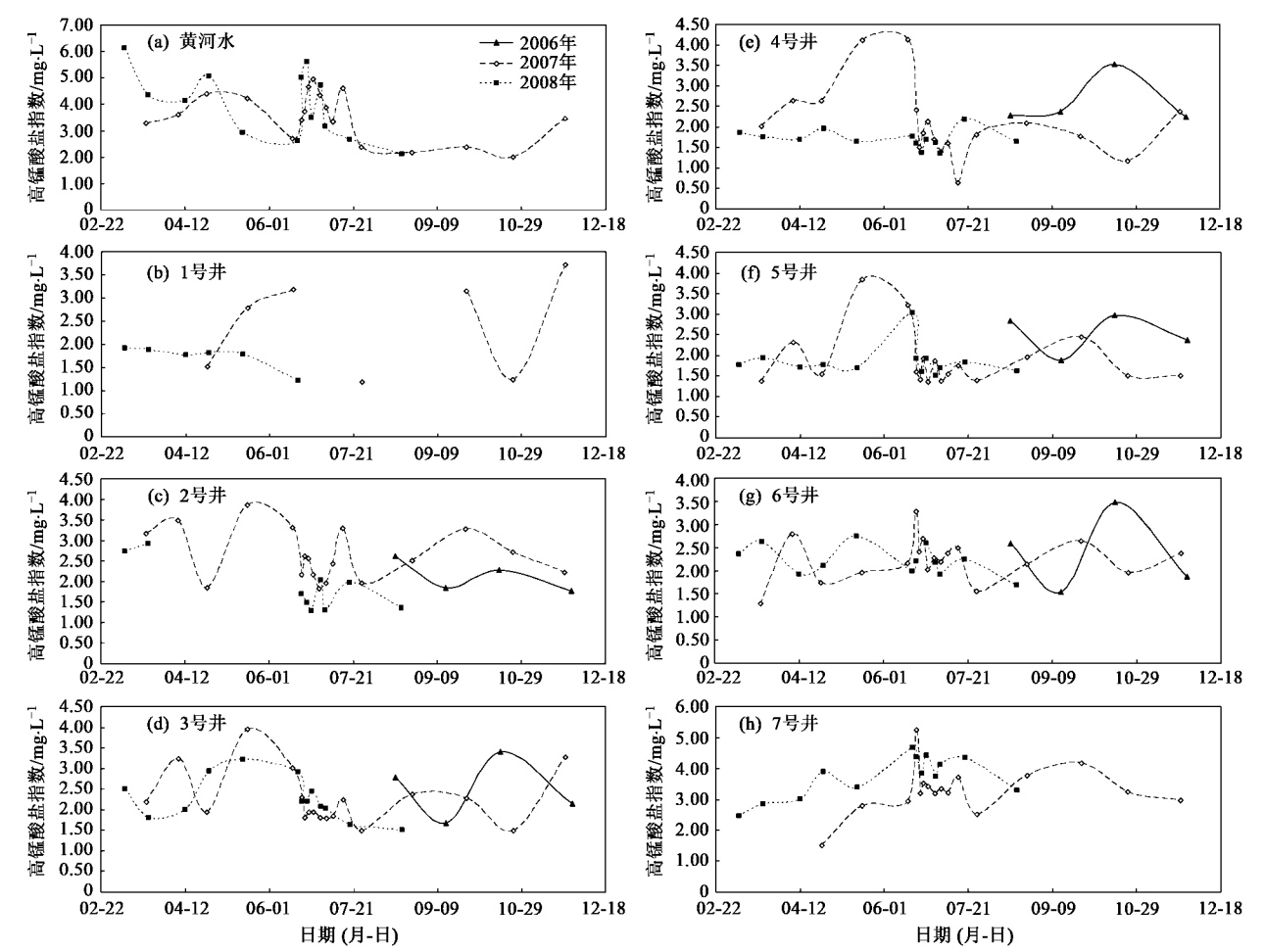


图 8 河岸带地下水观测井高锰酸盐指数变化趋势

Fig. 8 Changes of groundwater permanganate index in riparian zone

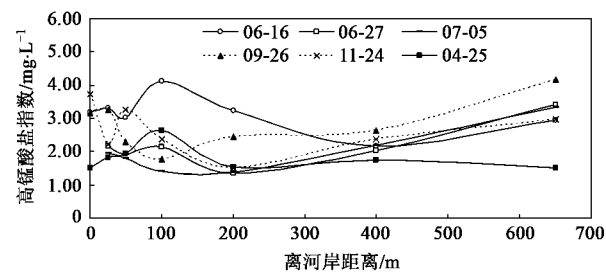


图 9 河岸带地下水高锰酸盐指数的空间差异性(2007 年)

Fig. 9 Spatial differences of groundwater permanganate index in riparian zone (2007)

著,在秋冬季节,土壤呈好氧环境,氮硝化作用显著发生,全年氮达到相对平衡的状态;在临近河岸的农耕旱作区,存在氮的硝化-反硝化作用,是高效的微生物氮净化单元。

(3)河岸带强烈的农业活动,尤其是人工湿地开发中大量施用肥料,易造成土壤表层有机质和氮磷养分流失,临近河岸 50 ~ 200 m 区域对于保护河流和地下水水质十分重要。

参考文献:

[1] Winter T C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems [J]. *Hydrogeology Journal*, 1998, 7: 28-45.

[2] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science [J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10: 52-67.

[3] Krause S, Bronstert A, Zehe E. Groundwater- surface water interactions in a North German lowland floodplain—Implications for the river discharge dynamics and riparian water balance [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(3-4): 404-417.

[4] 徐华山, 赵同谦, 孟红旗, 等. 河岸带地下水理化指标变化及其与洪水的响应关系研究 [J]. *环境科学*, 2011, 32(3): 632-640.

[5] Burt T P. Water table fluctuations in the riparian zone: Comparative results from a pan-European experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 265(1-4): 129-148.

[6] Burt T P, Bates P D, Stewart M D, *et al.* Water table fluctuations within the floodplain of the River Severn, England [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 262(1-4): 1-20.

[7] Rassam D W, Pagendam D E, Hunter H M. Conceptualisation and application of models for groundwater-surface water

interactions and nitrate attenuation potential in riparian zones [J]. Environmental Modelling & Software, 2008, **23**(7): 859-875.

[8] Westbrook C J, Cooper D J, Baker B W. Beaver dams and overbank floods influence groundwater-surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area [J]. Water Resources Research, 2006, **42**(6): 1-12.

[9] Hill A R, Duval T P. Beaver dams along an agricultural stream in southern Ontario, Canada: their impact on riparian zone hydrology and nitrogen chemistry [J]. Hydrological Processes, 2009, **23**(9): 1324-1336.

[10] Schilling K E, Li Z W, Zhang Y K. Groundwater-surface water interaction in the riparian zone-of an incised channel, Walnut Creek, Iowa [J]. Journal of Hydrology, 2006, **327**(1-2): 140-150.

[11] Lenkopane M, Werner A D, Lockington D A, *et al.* Influence of variable salinity conditions in a tidal creek on riparian groundwater flow and salinity dynamics [J]. Journal of Hydrology, 2009, **375**(3-4): 536-545.

[12] 邓伟, 潘响亮, 栾兆擎. 湿地水文学研究进展 [J]. 水科学进展, 2003, **14**(4): 521-527.

[13] 邓伟, 胡金明. 湿地水文学研究进展及科学前沿问题 [J]. 湿地科学, 2003, **1**(1): 12-20.

[14] 章光新, 尹雄锐, 冯夏清. 湿地水文研究的若干热点问题 [J]. 湿地科学, 2008, **6**(2): 105-115.

[15] 王兴菊, 许士国, 张奇. 湿地水文研究进展综述 [J]. 水文, 2006, **26**(4): 1-9.

[16] 毛战坡, 彭文启, 王世岩, 等. 三门峡水库运行水位对湿地水文过程影响研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, **4**(1): 35-41.

[17] 刘正茂, 孙永贺, 吕宪国, 等. 挠力河流域龙头桥水库对坝址下游湿地水文过程影响分析 [J]. 湿地科学, 2007, **5**(3): 201-207.

[18] 王国平, 张玉霞. 水利工程对向海湿地水文与生态的影响 [J]. 资源科学, 2002, **24**(3): 26-30.

[19] 王国平, 余国营. 水利工程对霍林河下游湿地的影响 [J]. 农业环境保护, 2001, **20**(6): 459-461.

[20] 章光新, 郭跃东. 嫩江中下游湿地生态水文功能及其退化机制与对策研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(1): 122-128.

[21] 贾忠华, 贾忠华, 罗绮, 等. 用 DRANMOGD 模型预测不同气候条件下排水及来水量对湿地水文的影响 [J]. 水土保持学报, 2003, **17**(5): 54-58.

[22] 王磊, 章光新. 扎龙湿地地表水与浅层地下水的水文化学联系研究 [J]. 湿地科学, 2007, **5**(2): 166-173.

[23] 贾忠华, 罗绮, 江彩萍, 等. 半湿润地区河滩湿地水文特性的模拟研究 [J]. 水利学报, 2007, **38**(4): 454-467.

[24] 刘兴土. 三江平原沼泽湿地的蓄水与调洪功能 [J]. 湿地科学, 2007, **5**(1): 64-68.

[25] 李胜男, 王根绪, 邓伟. 湿地景观格局与水文过程研究进展 [J]. 生态学杂志, 2008, **27**(6): 1012-1020.

[26] 王庆永, 贾忠华, 王珩, 等. 滨河湿地区域地下水平衡分析与研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, **19**(2): 68-71.

[27] 张昆, 田昆, 吕宪国, 等. 纳帕海湖滨草甸湿地土壤氮动态对水文周期变化的响应 [J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2216-2220.

[28] 赵同谦, 张华, 徐华山, 等. 黄河湿地孟津段不同植物群落类型土壤有机质含量变化特征研究 [J]. 地球科学进展, 2008, **23**(6): 638-643.

[29] 吕家珑, 张一平, 张君常, 等. 土壤磷运移研究 [J]. 土壤学报, 1999, **36**(1): 75-82.