

河岸带地下水理化指标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对象, 通过河岸带地下理化指标(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与洪水的响应关系. 结果表明, 受河流与荷塘蓄水的影响, 地下水温度最高点春季靠近荷塘, 冬季靠近河流; 小浪底调水也对湿地地下水水温产生影响, 在离河岸 100 m 处达到最大. 河岸带在沿岸 50 m 内, 存在一个硝化作用强烈的区域带, 其地下水 pH 较滩区其它区域偏低 0.2 ~ 0.4, 且年度变化幅度大. 河岸带地下水的浊度受农业灌溉的影响较其它指标更为明显; 在洪水退却初期, 由于水力携带作用会导致地下水及河水浊度的迅速上升. 河岸边坡的稳定性成为影响洪水退却初期土壤侵蚀程度的主要因素之一. 电导率、氯化物和硫酸根的检测结果表明, 位于沿岸 50 ~ 200 m 的范围内, 是河岸区重要的积盐带, 其宽度会随着季节的变化而变化, 同时这一区域也是重要的硫元素还原发生带. 距离河道 200 m 左右的区域内地下水水质受洪水影响显著, 水质理化指标变化强烈, 表明其水力联系非常密切, 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; 理化指标; 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)03-0632-09

Relationship Between Groundwater Quality Index of Physics and Chemistry 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, 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, affected by the river and pond water, the highest point of groundwater temperature is near the pond in spring, and near the river in winter; and regulation for water and sediment at the Xiaolangdi Reservoir also affects groundwater temperature in riparian zone, which reaches its maximum at 100 m far from the river bank. There exists a strong zone of nitrification area at 50 m from the river bank, and in this area, the groundwater pH value is lower by 0.2 to 0.4 unit than that of the other regions, with great annual varieties. The turbidity of groundwater is affected by irrigation, which is more obvious than other indicators of groundwater. The turbidity of groundwater and river water increase rapidly during the early phase of flood retreat, and slope stability of river bank is the initial impact of the soil erosion of river bank. Conductivity, chloride and sulfate data show that the range of 50-200 m in riparian wetland is a very important salt accumulation zone, and the width of salt accumulation zone changes with seasons, and this area is also a very important zone of sulfur reduction. The quality of groundwater at 200 m from the river bank is also significantly affected by floods. Physical and chemical indicators of water change strongly in this area. The result indicates that there is a very close relationship between groundwater and surface water, and it is the typical land and water ecotone between groundwater of riparian zone and the river. Rational protection for this region is critical for the conservation of water quality both in the river and groundwater.

Key words: riparian zone; groundwater quality; physical and chemical indicators; flood; relationship

收稿日期: 2010-04-17; 修订日期: 2010-07-18

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-09-0120); 国家自然科学基金项目(30570276); 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(SKLU2010-2-4); 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

河岸带地下水和河水存在复杂的交互作用^[1~3], 河水与地下水之间的交换作用主要表现在流出和流入 2 个方面^[4]。洪水季节,受河流水位上升的影响,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。在与河流进行水力交换的同时,河岸带也是陆生生态系统和水生生态系统进行物质和能量交换的界面,对河流营养物质的输入控制起到重要作用。洪水事件是影响河岸带地下水水位波动的重要水文过程,直接影响河岸带生物地球化学循环和植物生物多样性。在洪水事件中,土壤水和地下水得到比河流交互作用和降雨更充分补给。对于季节性积水的湿地(尤其是河岸带湿地),地下水与洪水过程对湿地环境的影响十分显著,地下水和地表水存在明显的补排关系,地下水和河水由于强烈的交互作用^[4~7]地下水水质也受到强烈影响。

国外有学者研究过海狸筑坝对河岸带地下水和地表水交互作用的影响^[8],也研究过海狸筑坝对上游河岸带水文过程和氮生物地球化学过程影响,海狸筑坝对地下水性质的改变,影响硝氮迁移和转化^[9]。也有学者在春季河水流量较大时监测河岸带地下水位和水质,分析河岸带地下水是否是河水硝酸盐氮的污染源^[10]。还有学者研究了河口地区河岸带地下水流和盐度输移受潮汐的影响^[11]。国内学者对湿地水文过程研究热点问题进行了归纳总结^[12~15],现有研究主要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]、湿地的蓄水与调洪功能^[24]、湿地系统景观格局与水文过程间的耦合机制^[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。

目前,就大坝建设对下游地下水和地表水交互作用及引起地下水水质变化的研究较少,本研究针对以上问题,结合黄河河岸带地下水位变化的实际观测,特别是小浪底水库调水调沙期间地下水理化指标变化,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理化指标变化;②洪水事件对地下水水质影响范围。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,距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。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,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)表示 2008 年速生杨树林改为旱地;2)表示 2008 年农业旱地改成荷塘

1.3 观测频率与指标

在平水、枯水期地下水采样周期为每 30 d 1 次;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 06-15~07-3,06-19~07-07,06-19~07-03)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 2~3 d 进行 1 次。监测指标包括水温、pH 值、电导率、浊度、氯化物、硫酸根,井水温度为井水水面下 30 cm 处温度。采样和实验室室内分析参见文献[29]。

2 结果与讨论

地下水电导率、pH 值是水文地球化学的重要指标,能灵敏地反映出地下水化学环境的变化,浊度则是衡量水透明度的指标. 地下水的理化指标(水温、pH 值、电导率和浊度等)易于测量,对其动态的观测可以佐证湿地地下水与河流之间的补排关系,同时还可以成为阐明其它问题的基础性资料,如盐分

积累、植物分布和污染物迁移扩散等问题.

2.1 地下水水温变化特征

2.1.1 时间变化趋势

观测期内各水井水温变化情况见图 1. 河水受气温的影响最大,最高温度 29.5℃ 出现在 8 月中下旬,最低温度 8.5℃ 出现在 4 月初,全年温度变化幅度 21℃;小浪底调水期间,库底水温偏低,下游河水温度变化幅度 10.5℃ 左右.

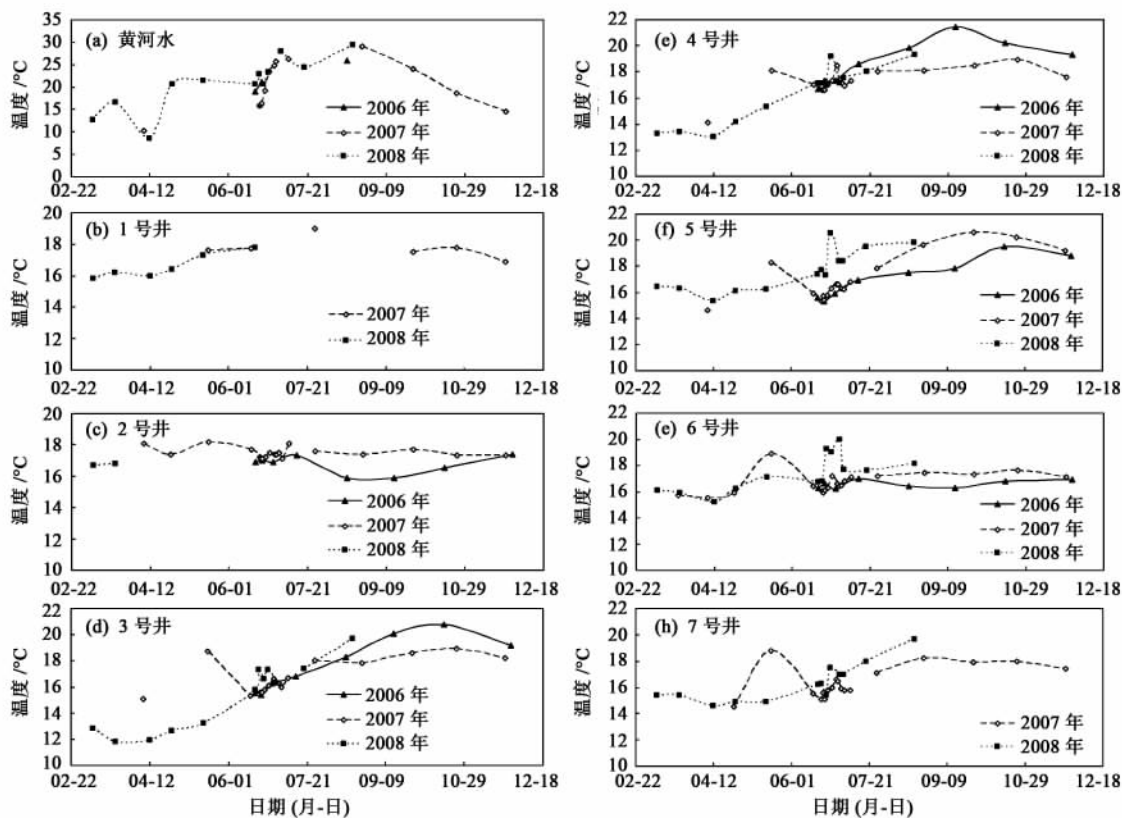


图 1 河岸带观测井水温变化趋势

Fig. 1 Changes of groundwater temperature in riparian zone

监测发现,位于岸边河床内的 1 号井受河水影响较大,最高温度 19℃ 出现在调水淹没后的 7 月下旬,最低温度 15.8℃ 出现在 3 月初(冬季未监测),全年温度变化幅度 3.2℃,变幅远小于河水;此井调水期内被淹没. 位于岸边边坡上的 2 号井水温受河水 and 气温的双重影响,最高温度 18.2℃ 出现在调水淹没前的 5 月下旬,全年温度变化幅度 2.3℃,变幅小于 1 号井;调水期内,初期水温有所下降,中后期水温有所升高,变幅为 0.5~1℃. 3~5 号井的变化趋势相同,最高气温出现在 10 月上旬,最低气温出现在 3 月底,全年温度变幅分别为 5.6、6.3 和 5.2℃;调水期最高温度均出现在中后期,温度变幅分别为 1.5、2.2 和 2.0℃. 6 号井全年变化幅度不

大,受荷塘蓄水的影响,最高气温 18.9℃ 出现在 5 月中旬,最低气温 15.2℃ 出现在 3 月底,全年温度变幅分别为 3.6℃;调水中期温度达到最高,变幅为 1.3℃,2008 年 6 月 23 日,受蓄水影响 6 号井被淹,因此水温偏高,并影响后 2 次的水温测量结果. 7 号井消除 5 月下旬的灌塘蓄水的影响,年变化趋势与 6 号井相同,全年变化幅度 4.8℃;调水期间最高温度出现在调水末期,温度变化幅度 1.8℃.

2.1.2 空间差异性分析

对地下水的水温进行空间差异性分析(图 2). 受河水与荷塘蓄水的影响,在垂直河道 100~400 m 的范围内,出现地下水水温变化异常偏高的区域,温度最高点随着季节的变化而在河流与荷塘之间波动.

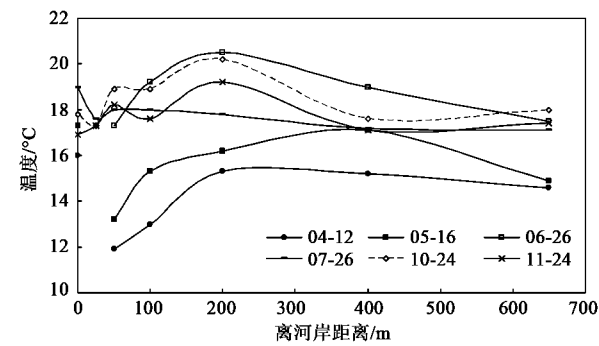


图2 河岸带地下水水温的空间差异性(2007)

Fig. 2 Spatial differences of groundwater temperature in riparian zone(2007)

研究区地下水的最高温度通常出现在10月中旬,最低气温出现在3月底,年度温度差异在离河岸

100 m 处达到最大;受河流与荷塘蓄水的影响,地下水温度最高点在它们之间往复移动,春季靠近荷塘,冬季靠近河流;小浪底调水也对湿地地下水水温产生影响,期内变幅为 0.5 ~ 2.2℃.

2.2 地下水 pH 值变化特征

2.2.1 时间变化趋势

观测期内地下水 pH 如图 3 所示. 除个别时段受荷塘蓄水的影响,河水和地下水的 pH 值在 6 月份达到最低,冬季 11 月 ~ 次年 3 月份达到最高;河水 pH 呈弱碱性(7.5 ~ 8.5),通常高于湿地地下水 0.2 ~ 1 个 pH 单位. 河水年度变幅偏大,约 1 个 pH 单位,调水期内变幅为 0.5 个 pH 单位;地下水的年度变幅总体差异性不大,最大 0.8 个 pH 单位出现在离河岸 50 m 处,最小 0.3 个 pH 单位出现在河床湿地的 1 号井.

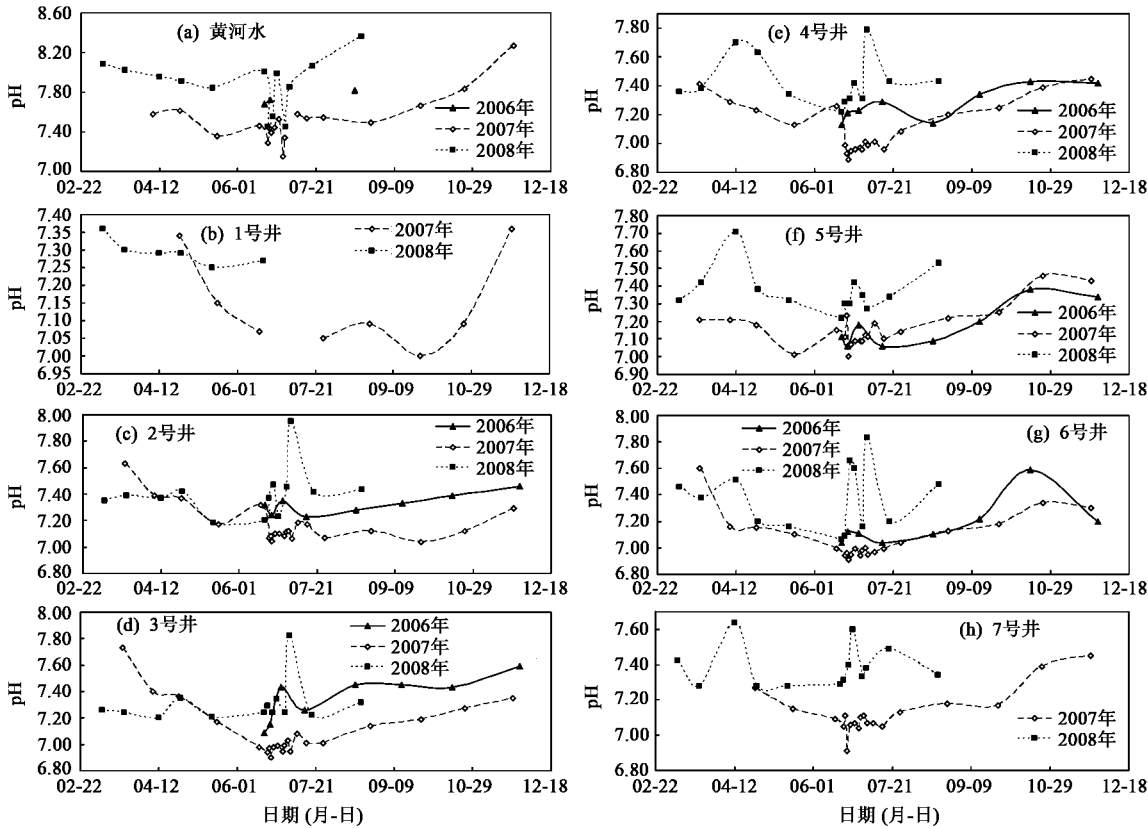


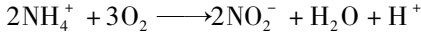
图3 河岸带地下水观测井 pH 值变化趋势

Fig. 3 Changes of groundwater pH in riparian zone

2.2.2 空间差异性分析

地下水 pH 进行空间差异性分析(图 4),发现滩区地下水的 pH 差异性不大,但在沿岸 50 m 内,地下水 pH 较滩区其它区域偏低 0.2 ~ 0.4 个 pH 单位,且年度变化幅度大. 原因可能是此河岸带内的

硝化作用强烈,微生物的硝化脱氮过程产生大量的游离氢离子,消耗了河水和地下水的碱性物质.



因此,河岸带地下水的 pH 的空间差异性在一定程度上反映了河岸滩区的硝化作用强度的空间差异性.

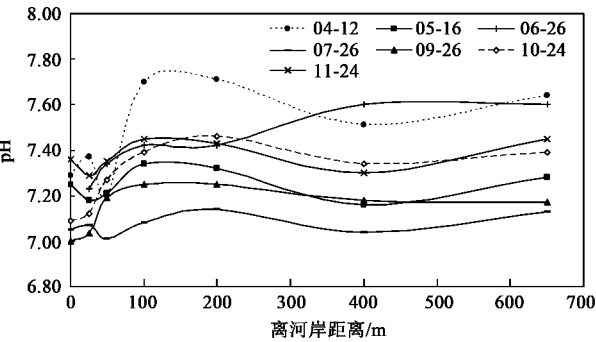
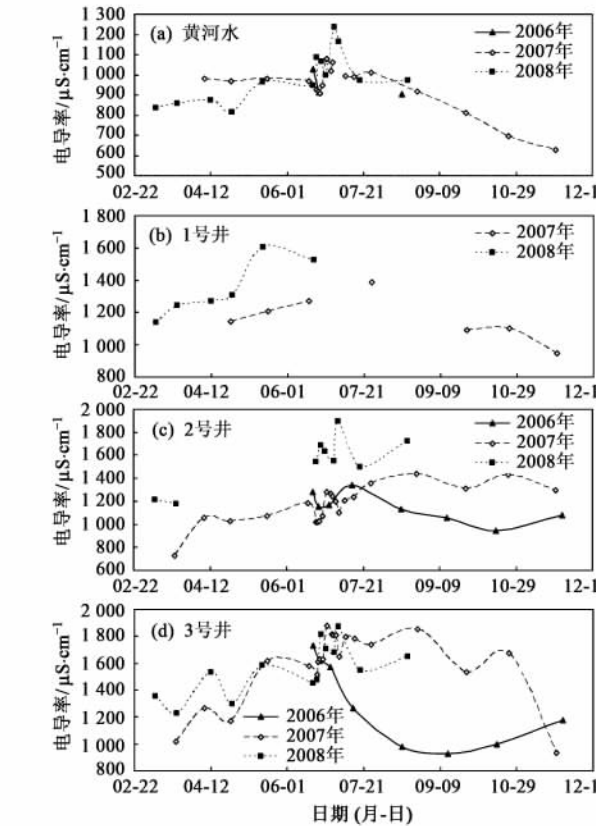


图4 河岸带地下水 pH 的空间差异性(2007)

Fig. 4 Spatial differences of groundwater pH in riparian zone(2007)

2.3 地下水电导率变化特征

电导率(EC) 是水体中总溶解离子浓度的总体反映, 在一定程度上反映了水分在流域水循环过程



中径流路径和滞留时间的长短. 水在运移过程中, 随着运移路径和滞留时间的延长, 不断溶解围岩和土壤中的溶解性盐类并发生离子交换, 在没有与电导率较小的水体混合、气体析出和溶解性固体沉淀的情况下, 水体的电导率是逐渐升高的. 因此, 根据流域内不同水体的电导率在空间上的分布趋势, 可以大致推断水的运移路径, 进一步推断流域内地表水和地下水的补给排泄关系^[30].

2.3.1 时间变化趋势

观测期内各水井的电导率变化情况见图 5. 河水与河岸带地下水的电导率在调水期间的 6 月达到全年的最大值, 在枯水期达到全年最小值. 显然, 地下水电导率受河水影响显著, 每年 6 月黄河小浪底调水调沙, 地下水水位升高超过临界值, 是河岸区重要的积盐期.

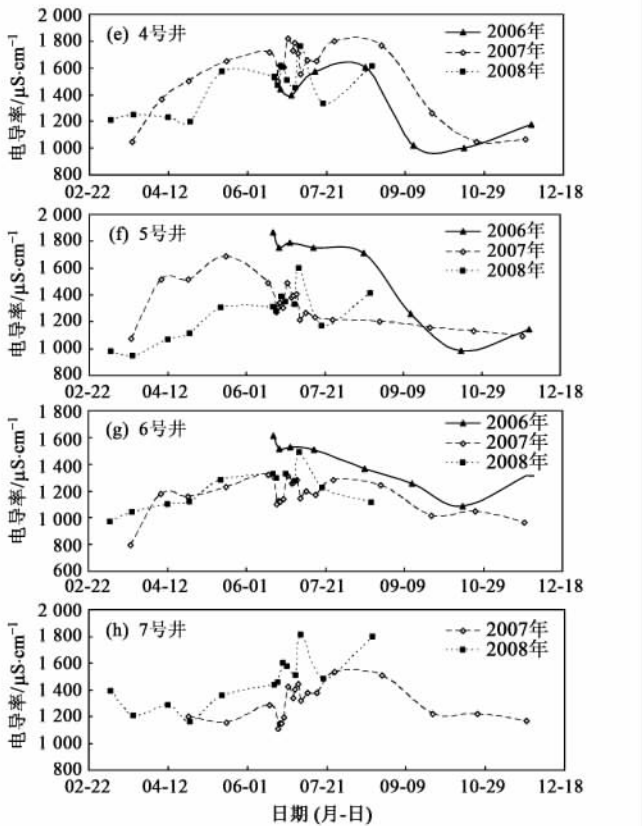


图5 河岸带地下水观测井电导率变化趋势

Fig. 5 Changes of groundwater conductivity in riparian zone

2.3.2 空间差异性分析

地下水的电导率空间差异性如图 6 所示. 河岸区积盐带宽度随着季节的变化而变化. 在冬季枯水期的 11 月, 河岸积盐带宽度最小(< 100 m); 进入春季之后逐渐加宽, 在 5 月的荷塘蓄水初期达到最

大(> 200 m); 之后随着河流影响力的减小而逐渐降低.

河岸带地下水电导率的变化与水位变化密切相关, 并且在一定程度上成为反映湿地水文的重要参数. 洪水初期, 河水通过淹没下渗、侧渗和底渗等方

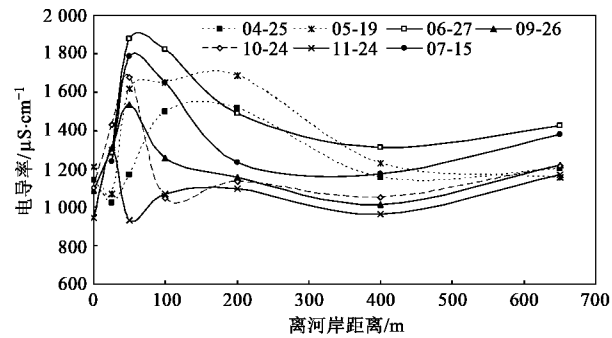


图6 河岸带地下水电导率的空间差异性(2007)

Fig. 6 Spatial differences of groundwater conductivity in riparian zone(2007)

式进入地下水,使地下水电导率迅速下降;洪水中期,河水在与地下水的交融过程中,电导率逐渐回升;洪水后,水位回落,充填在土壤表层的河水进一步与地下水混合,表现为与洪水初期相似的电导率下降.这种河水与地下水之间复杂的补排关系通过

地下水电导率的变化清晰地反映出来,成为较水位更能反映河岸带水文的重要的物理性参数.

在短暂调水期内,地下水电导率发生显著变化.通常在调水初期,电导率迅速下降,调水中期逐步回升,调水后1周内又迅速下降,之后回升至调水前状态,并持续到9月初的汛期结束.河水电导率低,地下水电导率高,河岸带地下水在调水期的剧烈波动,正好反映了河水与地下水在河岸区的补给排泄关系,即地下水电导率下降,表明河水补给地下水;地下水电导率升高,表明地下水排泄入河流.位于河岸200 m内的2、3、4和5号井的地下水电导率波动最大,成为河岸区重要的积盐带,即河流的潮碱带.位于此带上的土壤具有一定的盐碱土特征,一般旱地农作物受土壤盐分的胁迫会导致营养元素的利用率下降和产量的降低.

2.4 地下水浊度变化特征

观测期内各水井的浊度变化如图7所示.

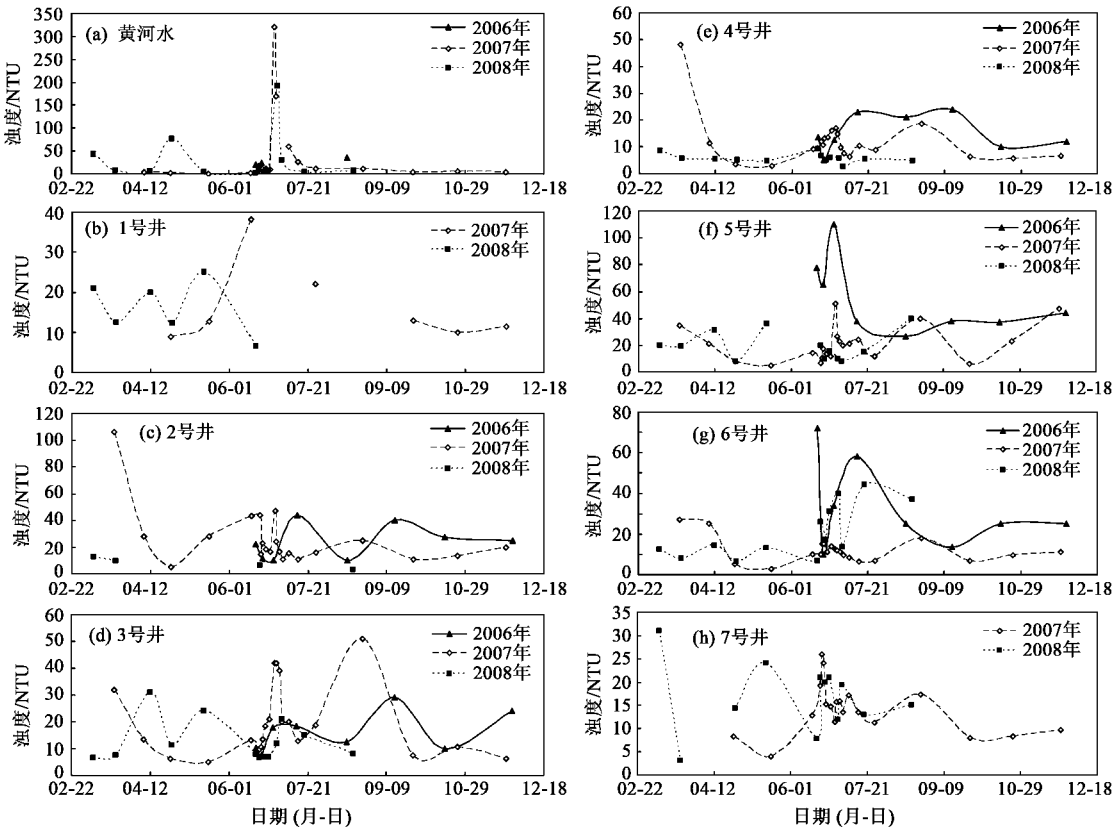


图7 河岸带地下水观测井浊度变化趋势

Fig. 7 Changes of groundwater turbidity in riparian zone

在非调水期,河岸带地下水受灌溉和荷塘蓄水的影响,在3~5月地下水浊度最低,全年整体规律性不明显;在调水期内,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.通过调查发现,退水初期在河岸50 m内常出现地下空洞,边坡底部形成暗流,水力携带大量的泥沙

进入河流,致使在退水初期河水浊度达到 321NTU,是平时的 100 倍,形成较为严重的水土流失. 因此河岸边坡的稳定性成为影响洪水退却初期土壤侵蚀程度的主要因素之一.

河岸带由于土壤通透性好,土壤水分的下渗和毛细蒸发较大,过浅的地下水水位容易引起土壤的

盐碱化,进而影响植物的发芽以致减产. 同时湿地排水进入河流,也引起河水盐分的升高,进而对下游农灌区的农业生产产生不良影响.

2.5 地下水氯化物变化特征

2.5.1 时间变化趋势

河岸带地下水观测井氯化物变化趋势见图 8.

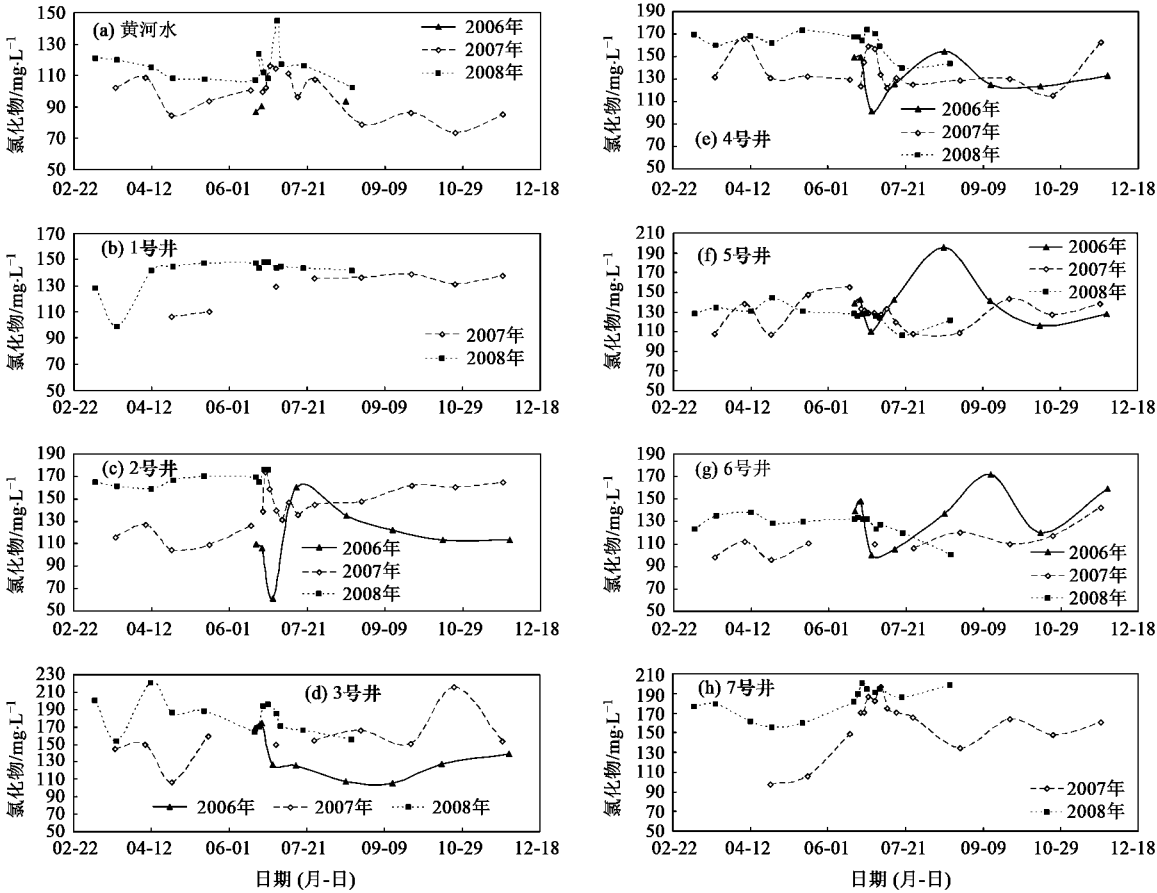


图 8 河岸带地下水观测井氯化物变化
Fig. 8 Changes of groundwater chloride in riparian zone

每年的 6 月调水期,河水和地下水的氯化物含量升高(图 8). 河岸 200 m 内的地下水氯化物波动比较显著,成为河岸区重要的积盐带,这与电导率的研究结果相似. 通过前期植物样方调查表明,此带生长的原生植物具有一定的盐土植物特征,植物类型由泌盐性植物柽柳向透盐性植物野艾蒿、油芒过渡.

2.5.2 空间差异性分析

氯化物空间分布(图 9)表明,在 50~200 m 的河岸带内存在一个地下水氯化物异常升高的区域,这一区域是由于水位的剧烈波动造成的,是河水与地下水相互交汇的区域,称为河岸积盐带. 该区域的宽度随季节变化而变化,春季达到最大,秋冬季节最小.

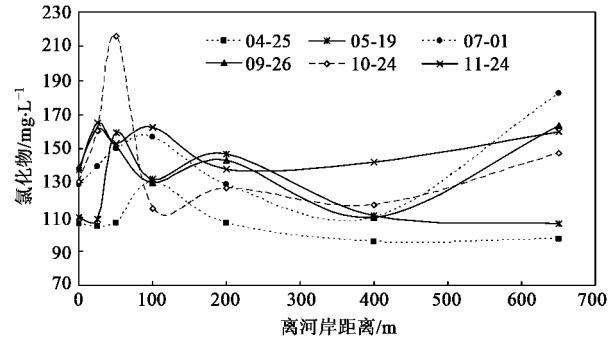


图 9 河岸带地下水氯化物的空间差异性(2007 年)
Fig. 9 Spatial differences of groundwater chloride in riparian zone (2007)

2.6 地下水硫酸根变化特征

2.6.1 时间变化趋势

河岸带地下水观测井硫酸根离子变化趋势如图

10 所示.

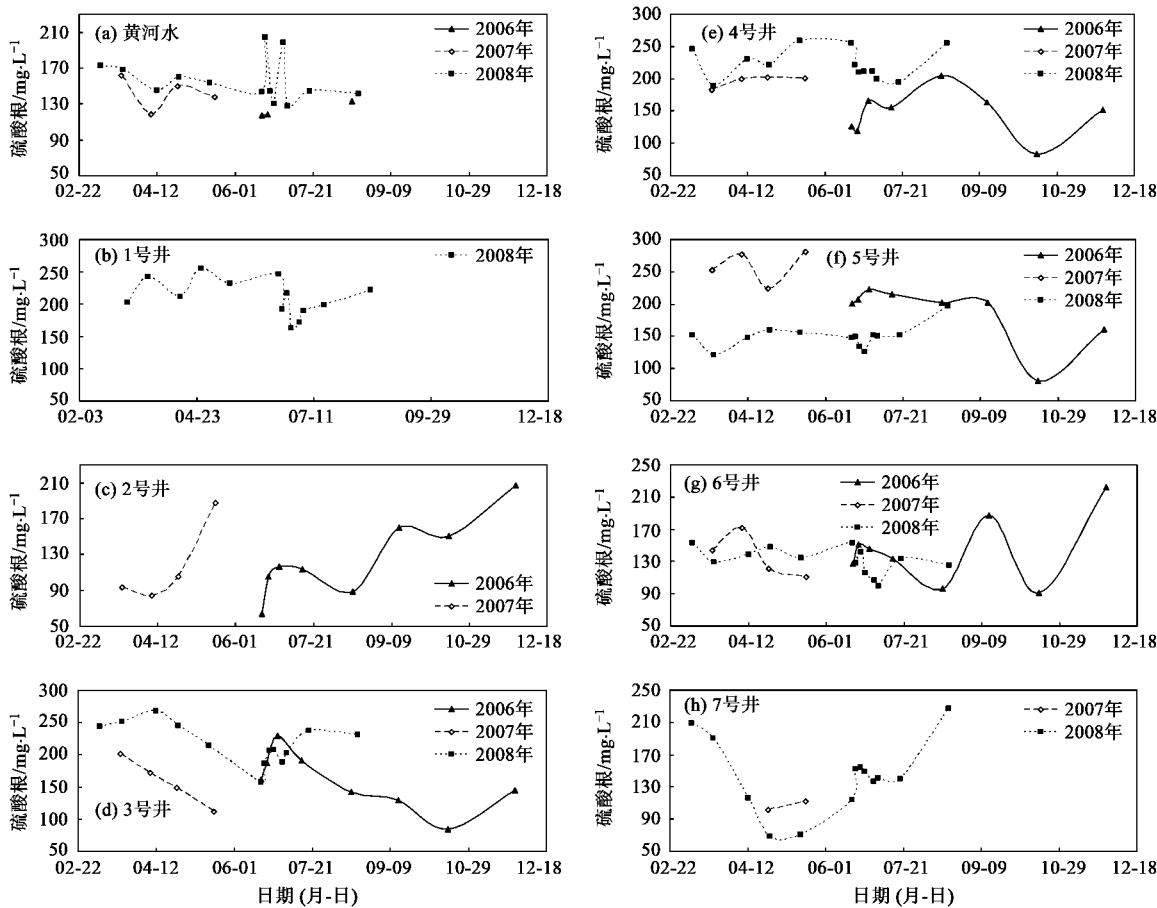


图 10 河岸带地下水观测井硫酸根变化趋势
Fig. 10 Changes of groundwater sulfate in riparian zone

硫酸根离子监测结果表现出与电导率和氯化物相同的变化趋势:在调水初期和末期出现 2 个异常峰值,全年其它时段基本稳定. 各观测井地下水硫酸根的时间变化趋势不统一. 通常认为,在厌氧条件下,如果有有机物来源丰富,产硫菌微生物具有较高的硫降解能力,硫酸盐含量降低;在好氧条件下,有机物来源匮乏,硫化物被氧化成硫酸盐,地下水中硫酸盐含量升高.

2.6.2 空间差异性分析

地下水硫酸根空间差异性表明(图 11),在河岸带 50 ~ 200 m 的积盐带上,地下水硫酸根异常升高,且年波动幅度大. 此区域作为河岸特殊的污染控制单元,其地下水有机质含量波动明显,受有机质来源和厌氧/好氧环境交替的影响,是一个重要的硫元素还原发生带.

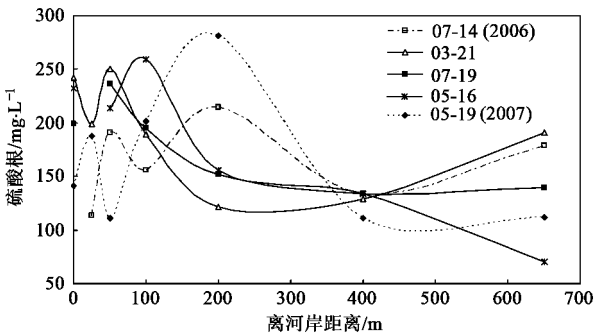


图 11 河岸带地下水硫酸根的空间差异性(2007 年)
Fig. 11 Spatial differences of groundwater sulfate in riparian zone(2007)

3 结论

(1) 研究区河岸带地下水温度受河流与荷塘蓄水的影响,温度最高点在它们之间往复移动,春季靠

近荷塘,冬季靠近河流;年度温度差异在离河岸100 m处达到最大。

(2)在垂直于河道50 m范围内,存在一个硝化作用强烈的区域带,其地下水pH较滩区其它区域偏低0.2~0.4个pH单位,且年度变化幅度大。

(3)每年6月是河岸区重要的积盐期;位于沿岸50~200 m的范围内,是河岸区重要的积盐带,积盐带的宽度会随着季节的变化而变化。地下水中氯化物发生着显著的波动;同时该区域也是河岸重要的硫元素还原发生带。

(4)距离河道200 m左右的区域地下水水质受洪水影响显著,是典型的水陆交错带,该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] Schmalz B, Springer P, Fohrer N. Interactions between near-surface groundwater and surface water in a drained riparian wetland [J]. *IAHS Publ*, 2008, **321**: 21-29.
- [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, 罗绮, 莫放, 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] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 38-47.
- [30] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究 [J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2007, **37**(1): 102-110.