

滨河湿地地下水水位变化及其与河水响应关系研究

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: 滨河湿地的发育与退化过程受河流水文过程的显著影响。以黄河湿地国家自然保护区孟津湿地为研究对象, 通过滨河湿地地下水水位变化 (特别是小浪底水库调水调沙期间) 野外定位观测, 深入分析了滨河湿地地下水水位与洪水的响应关系。结果表明, 滨河湿地地下水水位受河水水位影响显著, 地下水位的波动幅度与河岸距离之间存在明显的负指数关系, 调水期内这种关系的相关性达到最大 ($R^2 > 0.98$)。受滩区耕作制度、河道与监测井位垂直距离、河水水位变化的多重影响, 滨河湿地地下水水位年际变化差别较大。距离河道较远的人工湿地趋势呈“ $\sim$ ”形, 距离河道较近农耕旱地的井位则呈现“尖顶”型。距离河道 400 m 左右的区域内水位受洪水影响明显, 距离河道 200 m 以内区域水位受洪水影响显著, 尤其是距离河道 100 m 的区域变化强烈, 表明其水力联系非常密切, 为典型的滩区地下水-河流的水文交错带。该区域的合理保护 (100 m 以内为极重要区, 100 ~ 200 m 为重要区) 对于保护河流水质和地下水水质十分重要。

关键词: 滨河湿地; 地下水水位; 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)02-0362-06

Relationship Between Groundwater Level in Riparian Wetlands and Water Level in the 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: The development and degradation processes of riparian wetlands are significantly affected by river hydrological processes. By observing the variation of groundwater levels in riparian wetlands at the Kouma section of the Yellow River Wetland, especially that during the period of regulation for water and sediment at the Xiaolangdi Reservoir, relationship between groundwater level in riparian wetlands and flood water level in the river is studied. The results show that groundwater level in riparian wetlands is significantly affected by water level in the river investigated. There is a negative exponential relationship between groundwater level and the distance between wells and river. The correlation coefficient shows the maximum ($R^2 > 0.98$) during the period of regulation for water and sediment. Affected by the cultivation system in the flooding area, distance between monitoring wells and river bank, water level in the river variation of groundwater level in the wetland changed greatly. In artificial wetland, which is far from the river, the inter-annual variation in groundwater levels show a “ $\sim$ ” shape, while in the farmland, which is close to the river, the inter-annual variation of groundwater levels show a big peak. The groundwater level 400 m from the river is affected by flood events obviously, that in the area which is less than 200 m from the river is significantly affected by flood events in the area which is especially less than that in the area that is less than 100 m from the river, the groundwater level is affected by flood events intensively. The result indicated that there was a very close relationship between groundwater and surface water, and it was the hydrological ecotone between groundwater of riparian wetlands and the river. It is very important that rational protection for this region (very important for the area which is less than 100 m from the river, important for the area that is between 100 m and 200 m from the river) is critical for the conservation of water quality in the river and groundwater quality.

Key words: riparian wetlands; groundwater level; flood; relationship

滨河湿地的发育与退化过程受河流水文过程的显著影响。洪水季节, 受河流水位上升的影响, 滨河湿地部分被淹没或地下水水位上升, 厌氧的湿生环境发育; 平水、枯水季节, 滨河湿地地下水补给河水, 水位持续下降, 好氧的陆生环境发育。在频繁的好氧-厌氧环境的交替下, 滨河湿地成为兼有陆生、湿

收稿日期: 2010-03-05; 修订日期: 2010-07-05

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

生生物并存的生物多样性功能区. 在与河流进行水力交换的同时, 滨河湿地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. 湿地地下水与湿地表层水和大气降水之间的联系和水量交换过程是湿地系统水文过程的重要环节, 直接关系到湿地系统的水量平衡. 对于季节性积水的湿地(尤其是滨河湿地), 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. 河流进入平原后, 地势平缓, 沿岸滩地大量发育, 土壤入渗能力强, 地表产流产生能力十分微弱, 因此, 滨河湿地的地下水水文过程较地表径流产生过程更具有研究价值.

目前, 国外有关滨河湿地地下水文过程的研究主要集中于人类活动(上游植被砍伐)对下游滨河湿地水文和地下水水质的影响^[1], 不同生态系统类型对地下水的影响, 地下水流程和营养物质动态分布^[2], 海狸筑坝对上游滨河湿地水文和氮生物地球化学过程影响^[3]; 滨河湿地地表水和地下水的补排关系^[4~7], 不同时空条件下河流和洪泛区的相互作用^[8]等. 国内也有研究者对湿地水文研究热点问题进行了归纳总结^[9~12], 现有研究主要集中在水库建设对库区^[13]、坝址下游^[14~16]湿地水文过程的影响, 气候变化对湿地水文过程的影响^[17, 18], 湿地地表水与浅层地下水联系^[19], 滨河湿地受河道水位变化影响下的水文过程^[20], 湿地的蓄水与调洪功能^[21], 湿地系统景观格局与水文过程间的耦合机制^[22], 滨河湿地地下水平衡分析^[23]以及土壤氮素对湿地水文响应^[24]等方面.

针对大坝建设对下游地下水和地表水交换的影响研究的报道较少. 本实验针对以上问题, 结合黄河滨河湿地地下水水位变化的实际观测, 特别是小浪底

水库调水调沙期间的水位变化, 重点研究: ①强烈人类活动干扰下河水与地下水的补排关系及滨河湿地对洪水的调节作用(调节量大小和调节周期长短); ②滨河湿地对洪水调节作用的范围. 有关结论可以为基于滨河湿地地貌水文特征的生态重建工作提供科学依据.

1 研究区概况与实验设计

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^[25].

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(图 1), 距河床距离及井口标高如表 1 所示, 2007 年 4 月增加 7 号观测井, 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

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

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(每年持续约 10~15 d, 洪峰流量 3 500~4 300 m³/s) 由于水位变化波动幅度

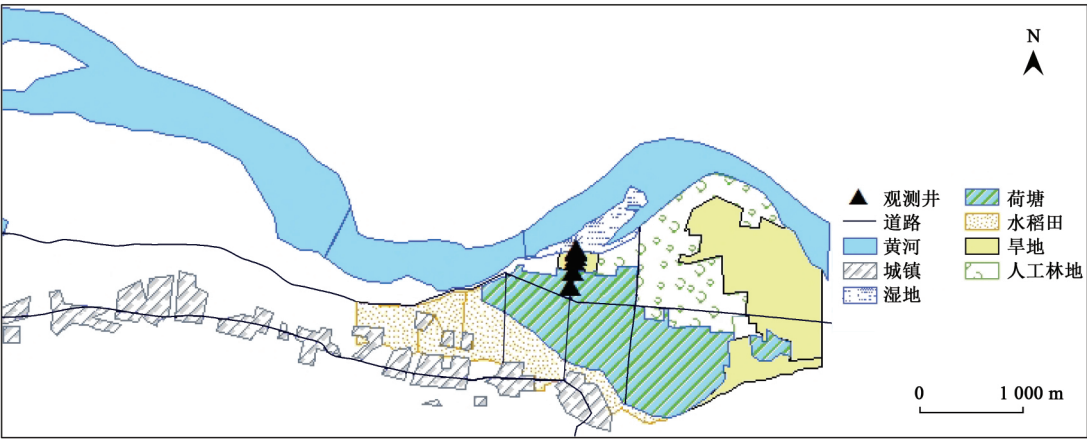


图 1 观测井示意

Fig.1 Sketch map of monitoring wells

大,多采取灵活的观测方法:调水初期和末期水位观测 1 次/12 h,调水中期和调水后观测期改为 1 次/24 h,调水后观测期持续 15 d;调水期间及调水后观测期水质监测采取 1 次/2 ~ 3 d. 野外观测设备包括:水位测量仪、卷尺、精密温度计等.

2 结果与分析

地下水水位是表征湿地地下水接受补给或向下排泄状况的动态指标. 2006 ~ 2008 年各地下水观测井的水位变化情况见图 2.

由图 2 可知,每年的 11 月 ~ 次年 3 月,滨河湿地的地下水水位达到最低,为枯水期;受小浪底调水的影响,每年 6 月中旬至下旬,滨河湿地地下水水位达到最高,为丰水期;其它时段为平水期.

湿地地下水水位受河流影响显著. 小浪底调水

期间(6 月中旬至下旬),地下水水位明显上升,离河岸越近,水位波动幅度越大,到达离河岸 650 m 远的 7 号已经不明显,各水井水位的年际波动幅度和调水期波动幅度见表 2. 各水井水位的波动幅度与河岸距离之间存在负指数关系,其中年际波动幅度差异性小,在一定程度上反映了滨河湿地滩区土壤母质的均一性;调水期波动幅度差异性大,反映了河水与地下水之间发生相互作用的范围受空间的制约,即离河岸越近,河水与地下水发生相互作用的程度越大. 关于地下水波动的时间响应上,鉴于监测仪器所限,各水井之间未发现明显的滞后效应. 除 6 月的惯例性调水外,小浪底也会根据沿黄农灌区的旱情进行临时性调水,如 2006 年 9 月初,2007 年 7 月下旬的临时性调水,均在地下水的变化趋势图上有所反映.

表 2 地下水观测井水位波动幅度

Table 2 Water level fluctuations of the groundwater monitoring wells

观测井号	年波动幅度/m			调水期波动幅度/m		
	2006 年	2007 年	2008 年	2006 年	2007 年	2008 年
2	2. 78	2. 51	2. 64	2. 47	2. 21	2. 11
3	2. 72	2. 53	2. 58	2. 38	2. 15	1. 97
4	2. 62	2. 41	2. 57	2. 25	1. 89	1. 79
5	2. 41	2. 44	2. 68	1. 38	1. 56	1. 29
6	2. 31	2. 32	2. 50	0. 85	0. 62	0. 59
7		1. 86	2. 44		0. 33	0. 37
与河岸距离(X)	$a = 2. 765\ 8$	$a = 2. 591$	$a = 2. 638\ 6$	$a = 2. 750\ 8$	$a = 2. 549$	$a = 2. 269\ 5$
的指数关系	$b = 0. 000\ 5$	$b = 0. 000\ 4$	$b = 0. 000\ 1$	$b = 0. 003$	$b = 0. 003\ 2$	$b = 0. 002\ 9$
$Y = a \cdot \exp(-bX)$	$R^2 = 0. 912$	$R^2 = 0. 874$	$R^2 = 0. 653$	$R^2 = 0. 977$	$R^2 = 0. 985$	$R^2 = 0. 984$

滨河湿地地下水水位除受河流的影响外,还受湿地开发类型和农业耕作制度的影响. 5 号、6 号、7 号的年际变化趋势呈“宝盖头”形,明显不同于位于

农耕旱地上的 3 口井呈“尖顶”形. 从 4 月中旬开始,荷塘开始灌塘蓄水,6 号、7 号水位因而明显上升,位于旱地的 5 号距离荷塘仅 80 m,水位上升约

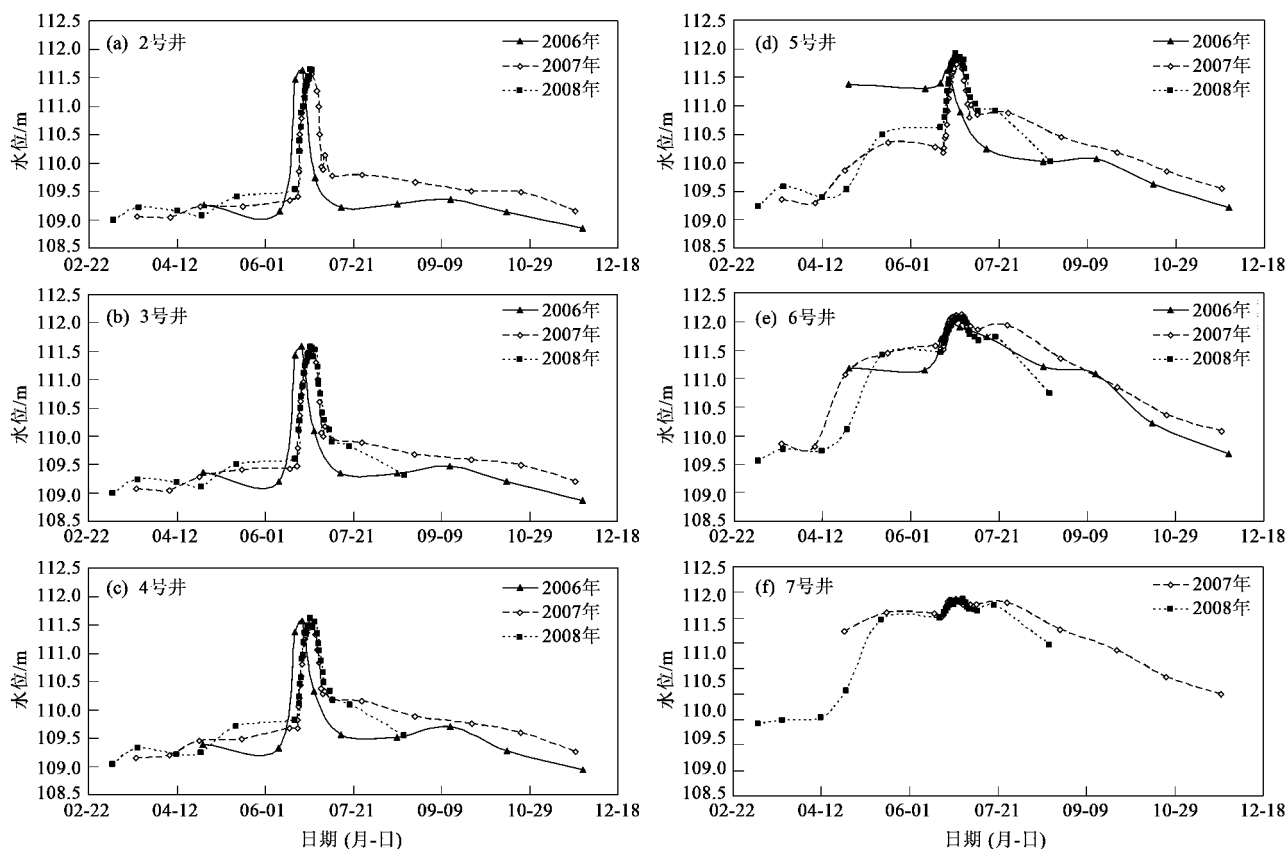


图2 滨河湿地地下水观测井水位变化趋势

Fig. 2 Changes of groundwater level in riparian wetland

滞后 15 d. 8 月上旬过后, 荷塘从黄河补水量减少, 地下水水位呈下降趋势.

对地下水进行空间差异性分析, 能得出地下水的流向以及与河流之间的补排关系, 如图 3.

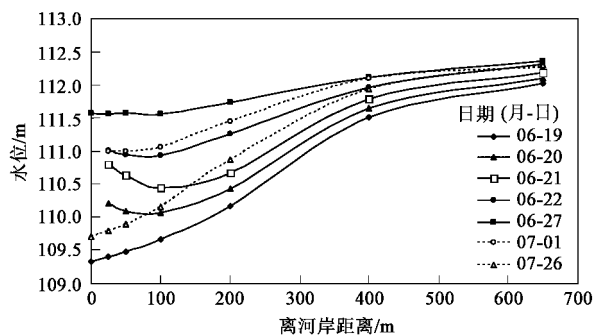


图3 滨河湿地地下水水位的空间差异性

Fig. 3 Spatial differences of groundwater level in riparian wetland

孟津扣马滩区的人工湿地及荷塘用水均来自于黄河大渠, 其源头是上游 30 km 的西霞院, 渠水最大引水量为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$, 年引黄河水量约 1 ~ 1.5 亿 m^3 , 对黄河南岸的孟津和巩义黄河滩区农业开发起到积

极的作用. 由于人工湿地的大量蓄水, 通过滩区土壤入渗, 湿地地下水的水位通常高于河流地下水, 地下水补给河水; 仅在调水初期, 河流水位迅速上升, 在沿岸 100 m 内出现河水反补给地下水的情况, 如图 3 中 6 月 21 日、22 日水位. 6 月 27 日河水及滩区地下水达到最高水位, 之后水位开始回落.

3 讨论

滨河湿地地下水和河水存在复杂的交互作用^[26,27]. 影响滨河湿地地下水水位的主要因素为自然因素和人为因素. 在滨河湿地, 对地下水水位影响最大的自然因素是河流水位, 由于河道水位变化以及降雨分布的不同会出现交替的补水/排水现象^[20], 每年丰水期的洪水淹没补给了湿地地下水, 地下水水位升高; 平水、枯水期湿地地下水反向补给河流, 湿地地下水水位降低. 洪水事件是影响滨河湿地地下水水位波动的重要水文过程. 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中更充分补给. 有学者研究过海狸筑坝对滨河湿地地下水和地表水交互作用的影响^[28], 结果发现海狸坝使得汛

期洪水深度、广度和持续时间都显著增加,同时不管是高流量还是低流量都抬高水位。

人类活动强烈影响滨河湿地的水文过程^[29],水利设施的修建对洪水下泄起到控制作用。湿地水质和其他生态特征受控于湿地水文过程和当地环境条件的联合影响,河水和地下水的补排受到河流调节的影响^[30]。人类对洪泛区过度农业开发,强烈改变河流湿地水文和生物地球化学过程^[31]。湿地地下水与湿地表层水和大气降水之间的联系和水量交换过程是湿地水文过程的重要环节,直接关系到湿地系统的水量平衡。对于季节性积水的滨河湿地,地下水在水文交换中的作用非常显著,地下水和地表水存在明显的补排关系。

滨河湿地具有蓄水与调洪功能^[21],地下水长期观测数据表明,滩区平均水力坡度为 0.4%,一般情况下河流长期接受地下水补给,粗略估算得出年均单宽流量约为 0.24 m³/d。但是,在上游小浪底调水调沙期内,河流得以持续保持高水位,河流回补滩区地下水现象明显,回补量主要由每年的小浪底水库调水量决定。此外,由于上游小浪底工程的洪水控制作用和滩区大面积的农业开发,农业灌溉已经成为影响滩区水文过程的一个重要因素,河流与湿地地下水的补排关系会随着滩区的开发类型而弱化或增强。根据调查计算,孟津扣马滩区约 4 400 hm² 的已开发滩区,年用水量约 0.54 亿 m³,约 0.20 亿 m³ 通过入渗进入滩区地下水进而补给黄河,因而此段河滩区(约 7.3 km)虽然农业开发程度高,超过 50% 被开发成人工湿地,仍具有较高的洪水调蓄能力,年调蓄能力约为 270 万 m³/km。

本研究结果表明,各观测水井水位的波动幅度与河岸距离之间存在明显的负指数关系,尤其是上游小浪底调水调沙期内,这种关系的相关性达到最大。同时,调水调沙期内的观测数据均清楚地表明,距离河道 400 m 左右的区域内水位变化较为显著,距离河道 200 m 以内区域水位产生较强烈变化,尤其是距离河道 100 m 的区域变化强烈,表明其水力联系非常密切,为典型的滩区地下水-河流的水文交错带。该区域的合理保护(100 m 以内为极重要区,100~200 m 为重要区),无论是对于保护河流水质还是地下水水质都是非常关键的。

4 结论

(1) 在母质均一的河岸滩地,各水井水位的波动幅度与河岸距离之间存在明显的负指数关系,调

水期内这种关系的相关性达到最大($R^2 > 0.98$)。

(2) 受滩区耕作制度、河道与监测井位垂直距离、河水水位变化的多重影响,滨河湿地地下水位年际变化差别较大,距离河道较远的人工湿地趋势呈“宝盖头”形,距离河道较近农耕旱地的井位则呈现“尖顶”型。

(3) 距离河道 400 m 左右的区域内水位受洪水影响明显,距离河道 200 m 以内区域水位受洪水影响显著,尤其是距离河道 100 m 的区域变化强烈,表明其水力联系非常密切,为典型的滩区地下水-河流的水文交错带。该区域的合理保护(100 m 以内为极重要区,100~200 m 为重要区)对于保护河流水质和地下水水质十分重要。

参考文献:

- [1] Jacks G, Norstrom A C. Hydrochemistry and hydrology of forest riparian wetlands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**(2-3): 187-197.
- [2] Banaszuk P, Wysocka-Czubaszek A, Kondratiuk P. Spatial and temporal patterns of groundwater chemistry in the river riparian zone [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, **107**(2-3): 167-179.
- [3] 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.
- [4] Angier J T, McCarty G W, Prestegard K L. Hydrology of a first-order riparian zone and stream, mid-Atlantic coastal plain, Maryland [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **309**(1-4): 149-166.
- [5] Harvey J W, Newlin J T, Krupa S L. Modeling decadal timescale interactions between surface water and ground water in the central Everglades, Florida, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **320**(3-4): 400-420.
- [6] Clement J C, Aquilina L, Bour O, *et al.* Hydrological flowpaths and nitrate removal rates within a riparian floodplain along a fourth-order stream in Brittany (France) [J]. *Hydrological Processes*, 2003, **17**(6): 1177-1195.
- [7] Grapes T R, Bradley C, Petts G E. Hydrodynamics of floodplain wetlands in a chalk catchment: The River Lambourn, UK [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **320**(3-4): 324-341.
- [8] Cabezas A, Gonzalez E, Gallardo B, *et al.* Effects of hydrological connectivity on the substrate and understory structure of riparian wetlands in the Middle Ebro River (NE Spain): Implications for restoration and management [J]. *Aquatic Sciences*, 2008, **70**(4): 361-376.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 贾忠华,罗筠,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.
- [19] 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.
- [20] 贾忠华,罗筠,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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Burt T P. Water table fluctuations in the riparian zone: Comparative results from a pan-European experiment[J]. Journal of Hydrology, 2002, **265**: 129-148.
- [27] 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**: 1-20.
- [28] 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): W06404, doi: 10. 1029/2005 WR004560, 2006.
- [29] Ward J V, Stanford J A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation [J]. Regulated Rivers-Research & Management, 1995, **11**: 105-119.
- [30] Hancock P J. Human impacts on the stream-groundwater exchange zone [J]. Environmental Management, 2002, **29**(6): 763-781.
- [31] Hohensinner S, Habersack H, Jungwirth M, *et al.* Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: The Danube River (1812-1991) [J]. River Research and Applications, 2004, **20**(1): 25-41.