

辽宁双台子河口湿地生态水文模拟与调控

罗先香¹, 张蕊^{1, 2}, 严登华³

(1. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100;

2. 山西省水资源研究所, 太原, 030001; 3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 在全球气候变化和人类活动影响下, 辽宁省双台子河口湿地出现生态用水不足, 水环境恶化, 土壤盐渍化和海水倒灌等问题, 导致湿地明显退化。为解决湿地生态用水供需矛盾, 从流域生态水文学角度出发, 运用所构建的生态水文耦合模型, 对 1981~2005 年双台子河口湿地集水区生态水文演变规律进行模拟, 结果表明: 25 年间湿地集水区各生态水文要素年际变化均呈减少趋势, 但减小范围并不明显; 年内变化呈单峰曲线, 主要集中在 7 月和 8 月。丰水年天然补水量为 8.32 亿 m^3/a , 基本可以满足生态需水要求; 平水年为 6.21 亿 m^3/a , 尚可满足湿地最小区的最低生态需水要求; 枯水年为 4.70 亿 m^3/a , 生态缺水严重, 生态补给量为 1.15~3.90 亿 m^3/a , 需采取相应调控措施, 以满足湿地生态需水要求。

关键词: 河口湿地; 生态水文模拟; 生态保护目标; 调控措施; 双台子

文章编号: 1000-0585(2011)06-1089-12

双台子河口湿地位于辽东湾北部, 辽宁省盘锦市境内, 属温带半湿润季风气候。主要天然植被以芦苇和碱蓬为主, 形成世界第二、亚洲第一大的滨海芦苇湿地和我国著名的风景旅游地——红海滩, 区内主要有丹顶鹤、白鹤、黑嘴鸥等 20 余种国家重点保护鸟类。受气候变化和人类活动影响, 河口地区“暖干化”趋势明显, 流域天然来水量减少^[1, 2], 直接导致湿地集水区天然水资源补给不足, 湿地生态用水匮乏; 同时流域水土资源开发利用导致自然湿地萎缩退化严重, 苇田、稻田转化成建设用地和旱地, 也有部分稻田被开发成了养殖区^[3]。流域上游生产生活用水挤占生态用水, 使得河流径流量减少, 加之工农业污染物排放, 造成湿地来水量减少, 河流基本属于超 V 类水体^[4], 严重影响湿地生态安全。如不采取有效调控, 未来随着环渤海开发战略进一步实施, 双台子河口湿地生态系统将面临极大风险。因此, 为保障湿地生态需水要求, 本文从流域生态水文学的角度出发, 依据研究区生态环境问题成因, 采用生态水文调控模式, 分析研究区生态水文演变机制, 提出基于生态保护目标的河口湿地生态水文调控措施, 以期双台子河口湿地生态恢复与重建提供理论依据。

1 湿地生态水文模拟

1.1 流域范围界定

本研究采用流域生态水文调控模式分析双台子河口湿地问题, 是基于如下因素: (1) 湿地范围的划定存在诸多难点, 主要原因是湿地并非相对独立的封闭系统, 无法监测湿地

收稿日期: 2010-06-21; 修订日期: 2010-09-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07208-009)

作者简介: 罗先香 (1972-), 女, 湖北麻城人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事湿地生态过程及环境效应、海洋生态环境预警及评价研究。E-mail: lxx81875@ouc.edu.cn

内部的降水径流形成量,其水文过程研究也存在不确定性,将湿地纳入流域范围进行分析,可以很好解决这一问题。(2)在气候变化的大背景下,流域水土资源开发利用是造成双台子河口湿地生态环境问题的根本原因,从问题导向原则出发,明晰流域人类活动对河口湿地的影响,分析湿地所在流域范围内的生态水文演变规律,是进行湿地生态水文调控的基础保障。

双台子河口湿地所在流域为柳河口以下流域(图1),属于三级流域,流域面积为13292 km²,其中山丘区面积为4661 km²,平原区面积为8631 km²,包括淡水面积6688 km²和咸水面积1943 km²。

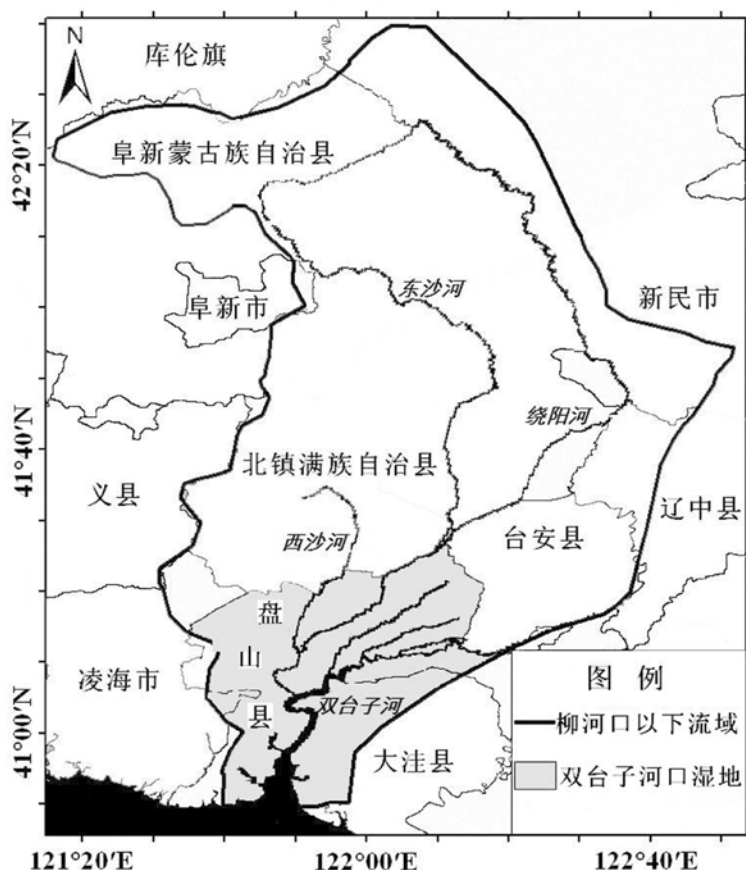


图1 柳河口以下流域

Fig. 1 The watershed below the Liuhe river mouth

1.2 湿地生态水文耦合模拟平台构建

湿地生态水文调控模式多采用生态水文模拟作为关键技术支撑,基于生态水文模型建模机理(图2),本研究采用模块化建模策略,通过提取相关过程模块,包括生态过程(由陆面群落模型—全球植被动力学模型^[5]中提取)、水文过程(从WEP模型^[6]提取)以及能量过程(由简单生物圈模型^[7]中提取),通过时空尺度嵌套,建立生态水文耦合模型。

生态水文模型的主要过程有:净初级生产力的生成、物质分配、物种死亡、土壤有机

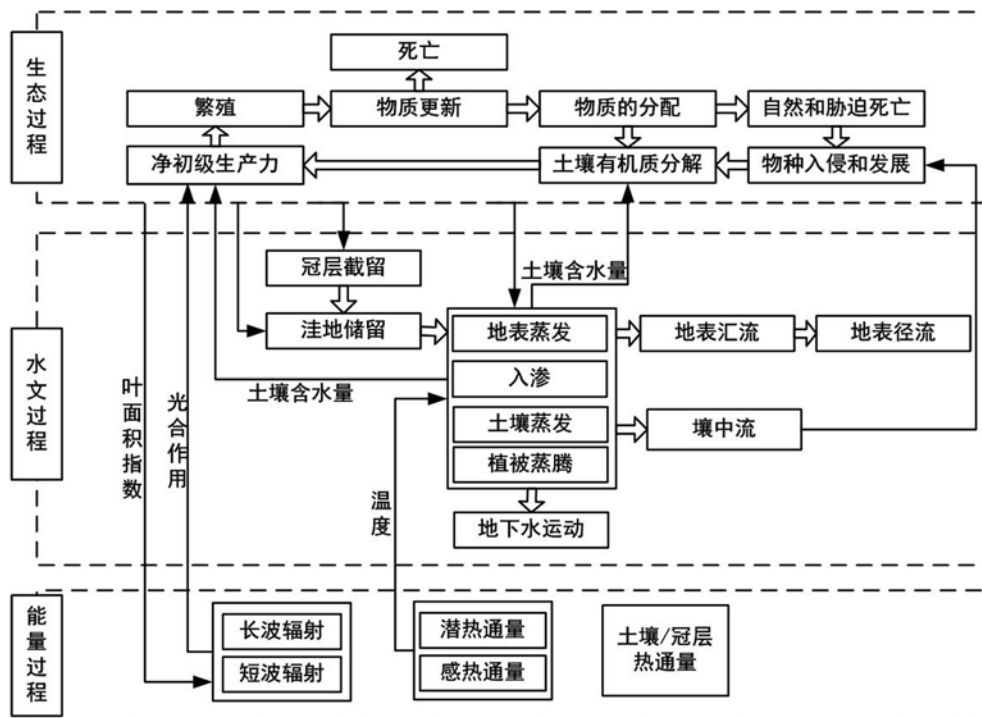


图2 生态水文模型构建机理

注：黑箭头表示各生态水文能量过程间的相互作用关系，

白箭头表示生态水文各过程内部的相互关系

Fig. 2 The interaction between ecological and hydrological processes

(black arrows indicate the interaction relationship between the processes of the energy and eco-hydrology; the white arrows indicate the interaction relationship within the eco-hydrological processes)

物分解、水域和土壤的蒸散发、地表产流、地下水运动、潜热和感热通量等过程。具体模块计算公式如表1所示。

以遥感和地理信息技术手段，结合使用，将双台子河口湿地纳入流域范围进行分析，建立了流域基础信息数据库，对流域地质地貌（流域1:25万高程数据）、土地利用（1986年、1996年、2000年和2005年四期全国土地利用分类图件）、气象水文（流域范围内七个典型测站，1956年至2008年间的降水、气温、相对湿度、日照、风速等五个指标的数据，河流水系与行政分区图以及1970年至1983年间的天然径流量和水质资料）、土壤植被（1:100万中国土壤分类图和中国植被分布图）、社会经济等数据进行了栅格化处理，在模拟检验过程中，收集到了双台子河两个测站（东白城子和王回窝堡）1970~1984年的流量数据，分为两期进行校验，其中1970~1980年为校正期，1981~1984年为验证期，通过结合野外原型观测结果，对饱和土壤导水率，土壤含水量以及土壤体积含水率等敏感参数进行了校正（图3所示）。模型校验期模拟结果的相对误差均控制在10%，相关系数达到0.76以上，Nash系数除东白城子站验证期为0.57外，其余校验期均达0.7以上，水文站径流量校验结果如表2所示。

表 1 生态水文过程主要模块计算公式

Tab. 1 Main formulas of eco-hydrological processes

过程	主要模块	公式	备注
生态	净初级生产	$\Delta m = 28.5 (A - R_a)$	A 为植被生长过程的光合作用, $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; R_a 为植被生长过程的呼吸作用, $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 28.5 为 CO_2 与生物量的换算系数;
	异速	$\Delta C_{\text{root}} = C_{\text{root}} - \frac{C_{\text{root}} \cdot \Delta C_{\text{leaf}}}{C_{\text{leaf}}}$	ΔC_{root} 为根碳量的改变; ΔC_{leaf} 为叶碳量的改变;
	生长	$\Delta C_{\text{leaf}} = C_{\text{leaf}} - \frac{-2\lg [1 - (FPC - FPC_{\text{excess}})]}{SLA}$	FPC 为植被覆盖度; FPC_{excess} 为植被覆盖度超出的部分; SLA 为特殊叶面面积;
	死亡 (自然)	$mort_{\text{greff}} = \frac{k_{\text{mort1}}}{1 + k_{\text{mort2}} \cdot greff}$	k_{mort1} 为是依赖于 PFT 的最大死亡率; k_{mort2} 为是生长率系数; $greff$ 为 (每年单位叶面积的碳含量) 是它本身的生长率;
	土壤有机质分解	$\text{delta}_c = c_0 - c_0 \times \exp(-k \times t)$	delta_c 为分解量; c_0 为初始量; k 为分解系数; t 为时间;
水文	地表蒸发	$E_w = \frac{(RN - G) \Delta + \rho_a C_p \delta e / r_a}{\lambda (\Delta + \gamma)}$	RN 为净辐射量; G 为传入水中的热通量; Δ 为饱和水蒸气气压对温度的导数; δe 为水蒸气气压与饱和水蒸气气压的差; r_a 为蒸发表面的空气动力学阻抗; ρ_a 为空气的密度; C_p 为空气的定压比热; λ 为水的气化潜热; γ 为 C_p/λ ;
	植被截留土壤蒸发	$E_i = Veg \cdot \delta \cdot E_p$	Veg 为裸地一植被域的植被面积率; δ 为湿润叶面的面积率; E_p 为可能蒸发量;
	超渗产流	$\partial H_{sv} / \partial t = P - E_{sv} - f_{sv} - R_{lie}$	β 为土壤湿润函数或蒸发效率;
	地表产流	$\partial H_s / \partial t = P(1 - Veg_1 - Veg_2) + Veg_1 \cdot R_{r1} + Veg_2 \cdot R_{r2} - E_0 - Q_0 - R_{ls}$	P 为降水量; E_{sv} 为蒸散发; f_{sv} 为由通用 Green-Ampt 模型算出的土壤入渗能力; R_{lie} 为超渗产流;
	蓄满产流	$c_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k(h_u - z_u) \frac{\partial h_u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k(h_u - z_u) \frac{\partial h_u}{\partial y}] + (Q_3 + WUL - RG - E - Per - GWP)$	Veg_1 、 Veg_2 为裸地一植生域的高植生和低植生的面积率; R_{r1} 、 R_{r2} 为从高植生和低植生的叶面流向地表面的水量; Q_0 为重力排水; E_0 为洼地储蓄蒸发; R_{ls} 为蓄满产流;
	地下水运动	$C_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_1 D_1 \frac{\partial h_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_1 D_1 \frac{\partial h_1}{\partial y}) + (Per - RG_1 - Per_1 - GWP_1)$	h 为地下水位 (无压层) 或水头 (承压层); C 为储留系数; k 为导水系数; z 为含水层底部标高; D 为含水层厚度; Q_3 为来自不饱和土壤层的涵养量; WUL 为上水道漏水; RG 为地下水流出; E 为蒸发蒸腾; Per 为深层渗漏; GWP 为地下水扬水。下标 u 和 1 分别表示无压层和承压层;
	无压层		
	承压层		
能量	潜热	$\lambda E_c + \lambda E_g = (e_a - e_m) \rho C_p / (\gamma \times r_a)$	e_a 为冠层空气区域 (CAS) 蒸汽压 (K, Pa); e_m 为大气边界层蒸汽压 (K, Pa); ρ 为空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_p 为空气比热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); γ 为湿度常数 ($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$); r_a 为冠层空气区域和相对高度之间的空气动力阻抗 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$);
	感热	$H_c + H_g = (T_a - T_m) \rho C_p / r_a$	T_a 为空气温度; T_m 为大气边界层温度; ρ 为空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_p 为空气比热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); r_a 为冠层空气区域和相对高度之间的空气动力阻抗 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$);

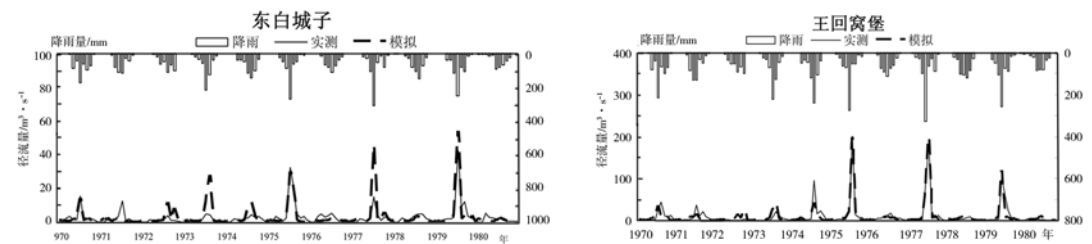


图 3 水文站径流量校验

Fig. 3 The runoff check of hydrological stations

表 2 径流模拟过程精度校验

Tab. 2 The accuracy verification of runoff simulation

校验结果	校正期		验证期	
	东白城子	王回窝堡	东白城子	王回窝堡
实测流量 (m ³ /s)	2.52	9.57	3.05	10.60
模拟流量 (m ³ /s)	2.63	8.63	2.76	9.84
相对误差 (%)	4.37	−9.74	−9.32	−7.18
相关系数	0.76	0.92	0.87	0.96
纳什系数	0.57	0.81	0.71	0.92

1.3 双台子河口湿地生态
演变特征

本文收集了四期土地
利用（1986 年、1996 年、
2000 年以及 2005 年）的图
件资料，并在 ARCGIS9.3
的工作平台上进行分析，

得到了沼泽湿地和滩涂湿地面积变化情况（表 3），结合该流域开发和土地利用的历史资料，将研究时段 1986～2005 年研究区生态格局演变的时间特征主要分为两个时段，即 1986～2000 年为退化期和 2000～2005 年为修复期。退化期湿地面积减少了 1.42 万 hm²，主要以河口地区滩涂湿地退化为主，面积减少了 0.91 万 hm²。主要由于气候变化，淡水补给不足，引起交错带上缩，致使沿海滩涂盐渍化特征加重，加之沿岸石油开采污染，近海围池养蟹占地用水排污等，严重影响翅碱蓬的生境条件，导致滩涂湿地减少，沼泽湿地面积减少了 0.51 万 hm²。一方面由于淡水资源补给不足，湿地土壤盐渍化加重，影响生境条件；另一方面由于农业开发，将部分湿地开垦为耕地，导致芦苇面积减少。修复期湿地面积增加了 0.04 万 hm²，两种类型湿地面积各增加 0.02 万 hm²。主要是自 2003 年以来的退耕还苇，移栽苇根，使湿地面积增加，规划预计到 2020 年实现退耕还苇面积达 2.67 万 hm²^[8] 以内，相关系数达到 0.76 以上，Nash 系数除东白城子站验证期为 0.57 外，其余校验期均达到 0.7 以上，水文站径流量校验结果如表 2 所示。

1.4 双台子河口湿地生态水文演变特征

基于生态水文耦合模拟平台，对双台子河口湿地集水区水量收支情况进行分析。引起

表 3 双台子河口湿地景观变化统计表（单位：万 hm²）

Tab. 3 The landscape change of Shuangtaizi
estuarine wetland (unit: 10⁴ hm²)

土地类型	1986 年	1996 年	2000 年	2005 年
沼泽	7.79	7.32	7.28	7.31
滩涂	1.46	0.56	0.55	0.56
湿地	9.25	7.89	7.83	7.87

湿地集水区水量变化的水文过程主要涉及降水、湿地蒸散发（包括湿地土壤、植被以及水域）、湿地入流和出流以及湿地土壤渗漏（图4）。入流数据是通过将三条河流（西沙河、绕阳河和双台子河）进入湿地集水区入口处单元格（图1）流量进行加和计算得到的，出流数据则是提取了湿地集水区出口处单元格的流量数据。

对流域各生态水文过程进行了1981~2005年共25年的逐日模拟计算，得到集水区生态水文演变特征（图5）。1981~2005年叶面积指数（LAI）、降水、蒸散发、渗漏、径流深（湿地入流与出流量差额分配到湿地集水区单位面积上的水量）以及天然补水量（集水区天然水量补给，天然补水量=降水量+径流深）年际变化均呈减少趋势，但减小幅度不大。叶面积指数变化范围为16.92~31.20，降水量为373.8~897.8mm/a，蒸散发为198.3~236.9mm/a，渗漏为0.22~0.41mm/a，径流深为52.3~125.7mm/a，天然补水量为1023.5~426.2mm/a。年内变化呈单峰曲线，主要集中在7月和8月。

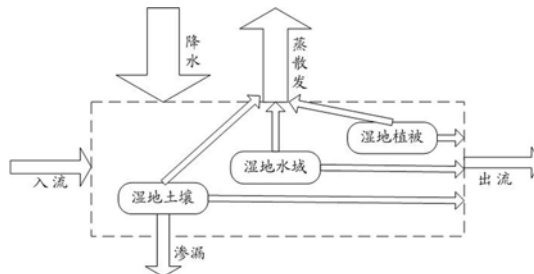


图4 湿地集水区水量收支示意图

Fig. 4 The water expenses and receipts diagram of wetland catchment

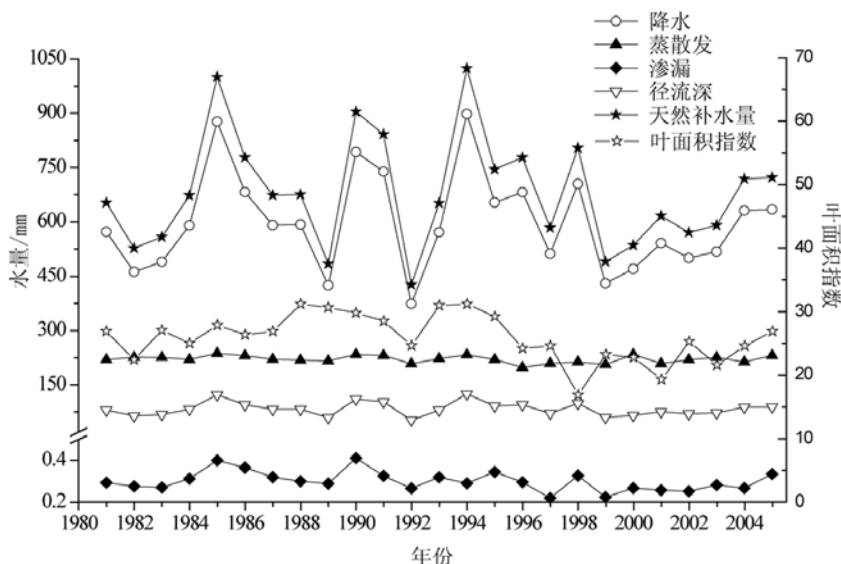


图5 1981~2005年双台子河口湿地集水区各生态水文要素演变特征

Fig. 5 The evolution law of eco-hydrological elements in the wetland catchment from 1981 to 2005

对25年降水量进行频率分析，通过绘制降水量频率曲线，确定不同水文年各要素过程水量变化，其中6个枯水年份、6个平水年份和13个平水年份（表4），湿地集水区天然补水量在丰水年水量为891.8mm，枯水年为503.8mm，平水年为665.6mm。

1.5 情景模拟

综合考虑气候变化和人类活动的影响，对未来变化环境下的生态水文过程进行不同情景模拟，重点分析气温、降水、上游土地利用格局变化以及上游来水变化对河口湿地集水

区生态水文过程的影响。对气候变化的统计显示，近 100 年来，地球平均温度升高了约 0.74℃，首份气候大会草案规定，全球气温上升范围限在 1.5~2℃。据相关预测《气候变化国家评估报告》，到 2020 年，我国年平均气温可能增加 1.3~2.1℃，年平均降水量可能增加 2%~3%。流域人类活动变化主要考虑将上游土地利用保持在单一土地利用格局上，如保持最完整的 1986 年、湿地明显退化的 2000 年以及湿地有所恢复的 2005 年，考虑极端情况下上游完全变为农田。此外，考虑上游来水变化增加或减少等，设定了 15 种情景模拟方案（表 5）。

表 4 不同水平年各要素过程水量变化（单位：mm/a）
Tab. 4 The elements of water at different levels (unit: mm/a)

水平年	降水量	蒸散发	渗漏	径流深	年份
枯水年	441.89	219.47	0.266	61.864	1982、1983、1989、1992、1999、2000
平水年	583.88	217.43	0.293	81.743	1981、1984、1987、1988、1993、1995、 1996、1997、2001、2002、2003、2004、2005
丰水年	782.30	229.90	0.354	109.52	1985、1986、1990、1991、1994、1998

按照上述 15 种情景模拟方案对双台子河口湿地 1980~2005 年进行情景模拟，对比动态年年均叶面积指数、降水量、蒸散发、渗漏、径流深以及天然补水量的变化情况，结果见表 6。

方案 1 是动态年变化情况。方案 2 至方案 5 模拟结果表明，温度升高，湿地集水区蒸散量和 LAI 显著增加，径流深和天然补水量明显减少。方案 6 和方案 7 改变降水量，除渗漏量不变外，其余要素均随之变化。方案 8 至方案 11 改变土地利用情况，模拟结果表明，1986~2000 年，湿地面积减少，LAI、蒸散量、渗漏量随之减小，径流深和天然补水

表 5 未来情景模拟方案设定
Tab. 5 The scenario simulation programs

方案	动态年	气温上升				降水量		土地利用格局改变			上游来水变化		
		0.74℃	1.3℃	1.5℃	2℃	增加 2%	减少 2%	1986 年	2000 年	2005 年	上游变为农田	增加 10%	减少 10%
1	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	×	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	×	×	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
4	×	×	×	▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×
5	×	×	×	×	▲	×	×	×	×	×	×	×	×
6	×	×	×	×	×	▲	×	×	×	×	×	×	×
7	×	×	×	×	×	×	▲	×	×	×	×	×	×
8	×	×	×	×	×	×	×	▲	×	×	×	×	×
9	×	×	×	×	×	×	×	×	▲	×	×	×	×
10	×	×	×	×	×	×	×	×	×	▲	×	×	×
11	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	▲	×	×
12	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	▲	×
13	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	▲
14	×	×	×	×	▲	×	▲	▲	×	×	×	×	×
15	×	×	×	×	▲	×	▲	×	×	×	▲	×	×

表 6 情景模拟结果分析
Tab. 6 The results analysis of scenario simulation

方案		LAI	降水量 (mm)	蒸散发 (mm)	渗漏 (mm)	径流深 (mm)	天然补水量 (mm)
1		—	—	—	—	—	—
2	变化量	0.05	0.00	4.28	0.00	−0.33	−0.33
	影响率 (%)	2.44	0.00	1.94	0.00	−0.39	−0.05
3	变化量	0.09	0.00	7.37	0.00	−0.61	−0.61
	影响率 (%)	4.18	0.00	3.34	0.00	−0.73	−0.09
4	变化量	0.11	0.00	8.64	0.00	−0.70	−0.70
	影响率 (%)	4.89	0.00	3.91	0.00	−0.84	−0.10
5	变化量	0.14	0.00	11.63	0.01	−0.94	−0.94
	影响率 (%)	6.56	0.00	5.26	3.33	−1.12	−0.14
6	变化量	0.01	11.95	0.56	0.00	2.36	14.31
	影响率 (%)	0.36	2.00	0.25	0.00	2.82	2.10
7	变化量	−0.01	−11.95	−0.59	0.00	−2.38	−14.33
	影响率 (%)	−0.28	−2.00	−0.27	0.00	−2.85	−2.10
8	变化量	0.02	0.00	1.26	0.01	−0.19	−0.19
	影响率 (%)	0.75	0.00	0.57	3.33	−0.23	−0.03
9	变化量	0.00	0.00	−0.38	−0.01	0.14	0.14
	影响率 (%)	−0.17	0.00	−0.17	−3.33	0.17	0.02
10	变化量	−0.01	0.00	−0.77	−0.01	−0.14	−0.14
	影响率 (%)	−0.38	0.00	−0.35	−3.33	−0.17	−0.02
11	变化量	0.00	0.00	9.01	0.02	3.52	3.52
	影响率 (%)	0.00	0.00	4.08	6.67	4.21	0.52
12	变化量	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.13
	影响率 (%)	0.05	0.00	0.00	0.00	0.16	0.02
13	变化量	0.00	0.00	0.00	0.00	−0.20	−0.20
	影响率 (%)	0.05	0.00	0.00	0.00	−0.24	−0.03
14	变化量	0.16	−11.95	13.19	0.02	−3.49	−15.44
	影响率 (%)	7.44	−2.00	5.97	6.67	−4.17	−2.27
15	变化量	0.00	−11.95	21.65	0.02	0.24	−11.71
	影响率 (%)	0.00	−2.00	9.80	6.67	0.29	−1.72

量增大；2000~2005 年，退耕还苇，湿地面积增加而耕地面积减小，LAI、蒸散量、径流深和天然补水量均减小；将上游土地利用均变为农田，蒸散发、渗漏、径流深和天然补水量均增大，分别增加 4.08%、6.67%、4.21%和 0.52%。方案 12 和 13 主要考虑上游来水量变化，模拟结果表明，来水变化对各要素影响较小，径流深和天然补水量随来水变化而变化。方案 14 和 15 属于组合方案，在气候变暖变干的条件下，湿地面积较大时，LAI 增加，径流深和天然补水量明显减小；上游耕地面积较大时，湿地集水区天然补水量减小。

分析结果表明，温度与湿地面积是 LAI 的主要影响因子，而气温、降水、土地利用都是蒸散发的主要影响因子，渗漏和天然补水量变化受降水和土地利用情况影响较大。

2 湿地生态保护目标

2.1 生态用地构成

依据湿地生态用地演变特征和区域生态功能定位，将湿地生态用地构成分为三类：最

小区、适宜区和规划区。最小区是指近 20 年来湿地未曾发生改变的区，即湿地保持稳定发展的区域，一旦湿地规模得不到满足，说明湿地生态水文演变规律发生突变，不适宜湿地正常发展，本研究设定最小区 7.72 万 hm^2 ，其中芦苇沼泽为 7.07 万 hm^2 ，碱蓬滩涂为 0.65 万 hm^2 。双台子河口湿地位于辽河三角洲的核心部位，有国家级自然保护区——双台子河口自然保护区，依据其生态功能定位“世界重要湿地之一，打造北方湿地休闲度假之都”，应保障保护区结构、规模和布局的稳定性，故将双台子河口自然保护区建设初的土地利用规模（面积为 9.25 万 hm^2 ）设定为本研究的生态用地适宜区，其中芦苇沼泽 7.79 万 hm^2 ，碱蓬滩涂 1.46 万 hm^2 。1986~2000 年，湿地退化严重，区域管理部门采取措施，通过移栽苇根^[8]，对湿地进行重建，计划到 2020 年累计退耕还苇面积为 4 万亩，本研究将计划增加的湿地面积纳入湿地规模的考虑范围，同时基于湿地生态用地演变特征，将 20 年来曾经有过湿地的区域，即满足湿地生态水文演变规律，适宜湿地留存的部分，设计为规划区，面积为 9.33 万 hm^2 ，其中芦苇沼泽 7.87 万 hm^2 ，碱蓬滩涂 1.46 万 hm^2 。湿地适宜区、规划区以及最小区结构布局如图 6 所示。

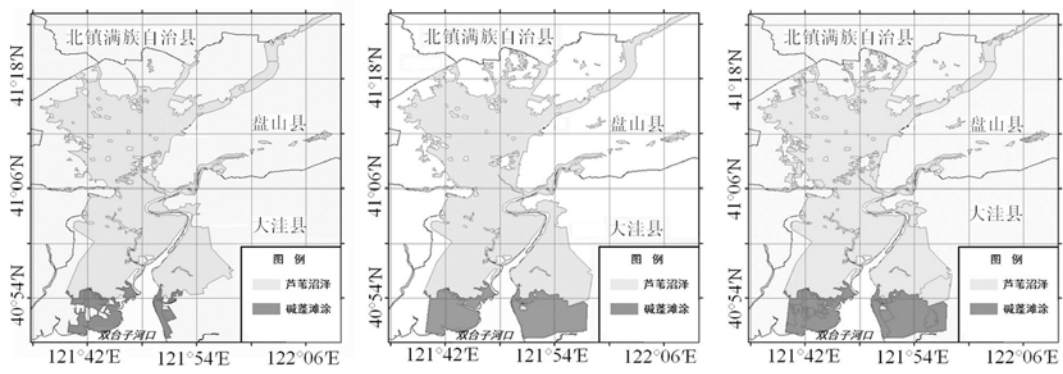


图 6 双台子河口湿地生态用地（左：最小区；中：适宜区；右：规划区）

Fig. 6 The ecological landuse of Shuangtaizi estuarine wetland
(left; Minimum area; middle; Suitable areas; right; Planning area)

2.2 生态需水

研究区生态环境的主要问题涉及湿地面积减少，湿地生态淡水补给不足，水环境污染等，对湿地规模和布局进行合理规划是湿地保护的前提，如果淡水补给得不到应有的满足，湿地规模也难以维持，因此，需要对湿地不同面积区进行生态需水核算，以保障湿地淡水补给，改善湿地生态环境。湿地生态需水核算应包括补充生态系统蒸散发消耗的水分，维持水生生态环境的空间——水生生物栖息地的水分，以及补给地下水需水，稀释净化污染物需水^[9]。

本文重点考虑了湿地植物需水、湿地土壤需水、动物栖息地需水、补给地下水需水以及稀释净化污染物需水等，经计算得到单位面积最小、适中以及最大生态需水，与多数学者^[10~12]研究结果相近，如表 7 所示。

湿地集水区多年平均蓄水量为 6.35 亿 m^3/a ，其中丰水年为 8.32 亿 m^3/a ，平水年为 6.21 亿 m^3/a ，枯水年为 4.70 亿 m^3/a 。湿地生态需水供需分析结果表明，丰水年水量较

表 7 双台子河口湿地单位面积生态需水量 (单位: $10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)

Tab. 7 The ecological water demand per unit area of Shuangtaizi estuarine wetland
(unit: 10^8 m^3 per square kilometers)

需水程度	最小需水量		适中需水量		最大需水量	
	芦苇沼泽	碱蓬滩涂	芦苇沼泽	碱蓬滩涂	芦苇沼泽	碱蓬滩涂
本文	0.0048~0.008	0.001~0.003	0.008~0.010	0.003~0.005	0.010~0.026	0.005~0.006
芦晓峰等 ^[9]	0.008~0.012	0.003~0.004	0.013~0.018	0.004	0.025~0.030	0.004~0.005
李加林等 ^[10]	0.008~0.013	0.001~0.002	0.011~0.019	0.001~0.002	0.014~0.02	0.001~0.002
赵博等 ^[11]	0.012~0.019	0.001~0.004	0.021~0.031	0.004~0.007	0.040~0.048	0.007~0.008

充足,生态缺水量大多为零,且小于 0.3 亿 m^3/a ,基本可以满足生态需水要求;平水年尚可满足最小区的最低生态需水要求,难以满足其它生态需水要求,总体缺水范围为 1.19~2.39 亿 m^3/a ;枯水年生态缺水严重,难以满足最小区最低生态需水要求,缺水范围为 1.15~3.90 亿 m^3/a ,如表 8 所示,因此,需要重点对枯水年水量进行合理调控,以保障河口湿地生态用水安全。

表 8 双台子河口湿地生态补给量 (单位: 亿 m^3/a)

Tab. 8 The eco-supply capacity in Shuangtaizi estuarine wetland (Unit: 10^8 million m^3/a)

需水等级	用地构成	湿地生态需水量		总生态需水量	湿地生态补给量		
		芦苇沼泽	碱蓬滩涂		丰水年	平水年	枯水年
最低	最小区	3.39~5.66	0.06~0.20	3.46~5.85	0	0	0~1.15
	适宜区	3.74~6.23	0.15~0.44	3.89~6.67	0	0~0.46	0~1.97
	规划区	3.78~6.30	0.15~0.44	3.92~6.73	0	0~0.52	0~2.03
适中	最小区	5.66~7.07	0.20~0.32	5.85~7.40	0	0~1.19	1.15~2.70
	适宜区	6.23~7.79	0.44~0.73	6.67~8.52	0~0.20	0.46~2.31	1.97~3.82
	规划区	6.30~7.87	0.44~0.73	6.73~8.60	0~0.28	0.52~2.39	2.03~3.90
最高	最小区	7.07~18.38	0.20~0.32	7.40~18.77	0~10.45	1.19~12.56	2.70~14.07
	适宜区	7.79~20.25	0.44~0.73	8.52~21.13	0.20~12.81	2.31~14.92	3.82~16.43
	规划区	7.87~20.46	0.44~0.73	8.60~21.34	0.28~13.02	2.38~15.13	3.90~16.64

3 调控措施

在生态水文演替规律分析的基础上,通过工程和非工程措施,对河口湿地生态系统的演化和发展进行人为控制,恢复或重建原有生态系统的结构和功能,达到湿地生态系统健康、持续演化的目标。在生态演化过程中要尽量避免逆行演替,使生态系统顺向演替,保持生态系统的健康和安全。

3.1 工程调水措施

在枯水年,天然来水明显难以满足生态需水要求,需要进行人工补水,从研究区存在的可调水路径来看,主要可以从大凌河引水,或是从大辽河调水,解决湿地来水不足的情况。大凌河水量相对较为充沛,利用白石水库下泄水量 2.7 亿 m^3/a ,将其输送到双台子河口湿地的东郭苇场的南井子、三义抽水站,可补给苇田生态用水;大辽河可调水 0.8~1.6 亿 m^3/a ,利用新开河口排灌站抽提水灌溉保护区苇田^[13]。合计工程调水可补给供水

量 $3.5 \sim 4.3$ 亿 m^3 , 可以满足河口湿地生态需水要求。

3.2 非工程措施

工程调水的总量较为局限, 单纯依靠调水还是难以满足生态需水要求, 采取必要的非工程措施, 成为双台子河口湿地生态保护的可持续发展途径。首先应加强有效的管理和协调措施, 在目前恢复重建的天然湿地管理中, 应强化及时的补水提高苇田质量和生态功能的关键对策, 同时协调生产生活与生态用水矛盾, 实现湿地优先保护; 其次应加强生态保护区重点防护, 包括湿地植被建设、鸟类栖息地恢复、娱乐和基础设施设备等建设。此外, 应提高生态系统跟踪监测与科学决策能力, 在已有水文监测的基础上增加生态指标监测, 跟踪监测生态系统结构、功能等表征因子的变化特征, 定期开展湿地生物多样性调查与生态系统结构与功能演变研究, 建立湿地生态系统健康的评价方法。最后, 还需建立合理有效的生态补偿机制和节水措施, 对湿地生态服务价值进行评估量化, 同时要求工程业主采取更多生态补偿措施, 缓解开发利用对湿地生态系统的胁迫和价值的损失, 鼓励其设计适当的环保措施, 比如: 补偿造林、野生动物保护、节水管理等非工程措施和行政手段来减少工程实施的不利影响。

4 结论

本文通过构建统一物理机制的河口湿地生态水文模拟平台, 对 1981~2005 年双台子河口湿地集水区生态水文演变规律进行模拟, 得到以下结果:

(1) 1986~2000 年为湿地退化期, 湿地面积减少了 1.42 万 hm^2 , 2000~2005 年为湿地人为修复期, 湿地面积增加了 0.04 万 hm^2 。

(2) 1981~2005 年的 25 年间湿地集水区各生态水文要素年际变化均呈减少趋势。适宜区、规划区以及最小区的生态用地面积分别为 9.25 万 hm^2 、 9.33 万 hm^2 和 7.72 万 hm^2 和生态需水阈值分别为 $3.46 \sim 18.77$ 亿 m^3/a 、 $3.89 \sim 21.13$ 亿 m^3/a 和 $3.92 \sim 21.34$ 亿 m^3/a 。

(3) 湿地集水区丰水年天然补水量为 8.32 亿 m^3/a , 水量充足, 基本可以满足生态需水要求; 平水年为 6.21 亿 m^3/a , 尚可满足最小区的最低生态需水要求; 枯水年为 4.70 亿 m^3/a , 生态缺水严重, 缺水范围为 $1.15 \sim 3.90$ 亿 m^3/a , 需采取调控措施, 以满足湿地生态需水要求。

参考文献:

- [1] 徐玲玲, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 近 20 年盘锦湿地变化特征及影响因素分析. 自然资源学报, 2009, 24(3): 483~490.
- [2] 王西琴, 张远, 刘昌明. 辽河流域生态需水估算. 地理研究, 2007, 26(1): 22~28.
- [3] 付在毅, 许学工, 林辉平, 等. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. 生态学报, 2001, 21(3): 365~373.
- [4] 王西琴, 李力. 辽河三角洲湿地退化及其保护对策. 生态环境, 2006, 15(3): 650~653.
- [5] Levis S, Bonan G B, Vertenstein M, Oleson K W. The community land model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide. Colorado: NCAR Tech. 2004.
- [6] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 111~131.
- [7] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part 1: Model formulation. Climate, 1996, (9): 676~705.
- [8] 任鹏飞. 我国面积最大的芦苇滨海湿地退耕还苇. 中国海洋报, 2003-08-19.
- [9] 崔宝山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. 环境科学学报, 2002, 22(2): 219~224.
- [10] 芦晓峰, 王铁良, 李波. 盘锦双台河口湿地生态环境需水量与水资源优化配置研究. 水土保持研究, 2008, 15(5):

93~96.

- [11] 李加林,赵寒冰,刘闯,等. 辽河三角洲湿地生态环境需水量变化研究. 水土保持学报,2006,20(2):130~134.
- [12] 赵博,王铁良,周林飞,等. 河口湿地生态环境需水量计算方法概述与应用实例,安徽农业科学,2007,35(18):5532~5534.
- [13] 王铁刚,李颖辽. 辽宁省双台子河口自然保护区生态湿地的保护对策,中国水利水电市场,2009,3.

Eco-hydrological simulation and regulation of Shuangtaizi estuarine wetland

LUO Xian-xiang¹, ZHANG Rui^{1, 2}, YAN Deng-hua³

(1. Key Lab of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education,
Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

2. ShanXi Institute of Water Resources, Taiyuan, 030001, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to the impact of global climate change and human activities, there are some problems such as ecological water scarcity, water quality degradation, soil salinization, seawater intrusion and so on, resulting in area reduction of Shuangtaizi estuarine wetland. To restore and protect the wetland environment and address the balance of water supply and demand in wetland, this paper used the eco-hydrological coupling model in the eco-hydrological viewpoint, and simulated eco-hydrological processes of Shuangtaizi estuarine wetland from 1981 to 2005. The results showed that: the inter-annual change of the hydrological elements in the wetland showed a decreasing trend, but the reduced coverage was not significant; the annual change showed a single peak curve, mainly in July and August. The natural supplement water was 8.32 billion cubic meters per year in the wet year, which can meet the eco-water demand. The natural supplement water was 6.21 billion cubic meters per year in normal year, which can meet the minimum eco-water demand. Eco-supply capacity was 1.15—3.90 billion cubic meters per year in the low flow year with the natural supplement water being 4.70 billion cubic meters per year. The eco-water demand can be met after the appropriate measures for ecological supplement regulation are taken.

Key words: estuarine wetland; eco-hydrological simulation; ecological containment objective; regulation measures; Shuangtaizi