

基于 SWAT 模型的西辽河流域自然湿地演变过程及驱动力分析

于成龙^{1,2}, 王志春³, 刘丹^{1,2*}, 赵慧颖^{1,2}, 官丽娟^{1,2}, 田宝星^{1,2}

(1. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030; 2. 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030; 3. 内蒙古自治区赤峰市气象局, 赤峰 024000)

摘要: 该研究基于 SWAT 模型模拟、景观转换分析、地理探测器计算等方法, 使用气象观测、数字高程模型、土地利用遥感监测、植被指数等数据, 以西辽河流域为研究对象, 划定流域边界, 分析 1980—2015 年西辽河流域的面积变化和景观动态变化特征, 研究自然和人为因素对湿地变化的驱动效应。结果表明: 1980—2015 年西辽河流域湖泊和沼泽面积均呈下降趋势, 多数土地利用类型侵占过沼泽和湖泊, 其中耕地侵占的面积最大; 1980 年以来西辽河流域经历了干-湿-干的变化过程, 大部分时间为干生生境; 2000—2015 年西辽河流域沼泽湿地生长季 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 平均为 0.30, 年 GPP(Gross Primary Productivity) 平均为 257.73 g/(m²·a), 均呈极显著上升趋势; 湖泊面积、沼泽湿地面积和径流深度的变化与降水量和蒸散量的相关关系极显著, NDVI 和 GPP 与生长季积温的相关关系极显著; 自然因素对湿地变化的影响要大于人为因素, 降水量是西辽河流域湿地变化的主要控制因子, 降水量和蒸散量的协同作用对湖泊、沼泽和径流深度变化的驱动能力 $q > 0.70$ 。该研究可为湿地农业综合开发和可持续发展提供科学参考。

关键词: 土地利用; 模型; NDVI; 湿地; 气候变化; SWAT; 西辽河

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.032

中图分类号: P343

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-22-0286-12

于成龙, 王志春, 刘丹, 等. 基于 SWAT 模型的西辽河流域自然湿地演变过程及驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 286-297. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.032 http://www.tcsae.org

Yu Chenglong, Wang Zhichun, Liu Dan, et al. Evolution process and driving force analysis of natural wetlands in Xiliao River Basin based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 286-297. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.032 http://www.tcsae.org

0 引言

湿地是结构独特、功能多样的生态系统, 在维持区域乃至全球生态平衡方面起着不可替代的作用^[1]。湿地的外因性演替过程与气候、地质活动、自然灾害干扰和人为干扰等因素密切相关, 以气温升高、降水格局改变为主要特征的全球气候变化对湿地生态系统的分布格局及其生态过程已经产生深刻影响^[2-3], 同时, 随着社会发展, 人类活动对湿地生态系统的影响也不容忽视, 气候变化和人类社会发展的综合作用将使未来湿地恢复与管理变得更加复杂。不同类型、气候背景、发育过程的湿地具有不同的压力源, 这些湿地生态系统正以各自的演变方式应对气候变化和人类社会的干扰。另外, 湿地在自身改变的同时, 也对区域生态系统网络乃至气候产生重要影响^[4-5], 如何保护、恢复与管理湿地生态系统, 取决于如何应对气候变化和人类社会发展的影响, 因此了解湿地生态系统长期演变规律, 定量分析气候和人为

因素对湿地变化的贡献率, 对于准确评估湿地生态系统演变的驱动力具有积极意义。

对湿地变化驱动力的研究一直以来都是湿地地理学和生态研究的热点问题, 国内外众多学者在湿地分布景观格局、湿地植被、湿地养分循环、水文特征等方面开展广泛研究, 如张玉红等^[6]研究了 1979—2013 年扎龙湿地景观格局的动态变化特征; Feng 等^[7]研究了地下水位对鄱阳湖湿地优势植物生长和繁殖参数的影响; Mantyka-Pringle 等^[8]研究了气候变化和土地利用变化对湿地生物多样性的影响; Ott 等^[9]描述了在弗吉尼亚海岸湿地土壤属性随时间的变化特征; Yang 等^[10]研究了气候变化和外来物种入侵对中国东部沿海地区有机碳储量的影响; Cassatt 等^[11]将降水、地表水和地下水等水文数据与湿地恢复和气候变化脆弱性联系起来, 研究湿地的水文特征对湿地恢复的影响。以上研究取得了丰富的成果, 积累了丰富的湿地变化过程以及湿地应对自然和非自然干扰能力的知识。但在湿地面积、湿地植被以及河流流量等的研究中, 仍然缺乏对气候变化和人为影响(以土地利用变化为主)加剧等原因的整合^[12], 而了解气候变化和人为影响的协同作用是制定湿地恢复与保护措施所需科学支撑的必要条件。

西辽河流域位于中国北方农牧交错带的东缘, 清朝以后人类活动频繁, 大面积开垦耕地, 加上该区域属温带大陆性气候, 干旱少雨^[13], 大部分河流存在季节性断流现象, 导致该区域由原始自然的“郁葱”环境向沙漠

收稿日期: 2020-08-11 修订日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41665007; 31801253); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019D014); 黑龙江省寒区湿地生态与环境研究重点实验室(201904)

作者简介: 于成龙, 博士, 高级工程师, 主要从事生态气象方向研究。

Email: nefuycl@163.com

*通信作者: 刘丹, 博士, 正高级工程师, 主要从事生态气象方向研究。

Email: nefuliudan@163.com

化的“活化”发展^[14], 近些年来已有 50%以上的土地存在荒漠化现象^[15], 区域生态环境十分脆弱, 湿地作为该区域生态系统网络的关键节点, 在维持区域生态平衡方面起到不可替代的作用。目前有关西辽河流域的研究, 对于湖泊、沼泽和河流在不同时空尺度上的变化以及相互转化的认识比较清楚, 在湿地变化的驱动因素方面也开展了较多研究^[16], 但多数只停留在探寻湿地变化单驱动因子的作用, 很少研究多因子耦合的驱动效应, 也没有明确驱动因子在湿地变化过程中的贡献率。随着气候变化、自然灾害、人为干扰等因素对自然湿地影响的加剧, 需要提高对导致湿地变化的自然或非自然驱动因子协同作用的理解, 并评估这些协同作用对湖泊、沼泽和河流等湿地类型的影响。本文通过研究西辽河流域湖泊和沼泽湿地面积、景观转换特征、沼泽湿地植被变化特征以及河流径流深度变化特征, 明确研究区不同湿地类型的较长时间序列的变化特征以及他们之间的转化过程, 通过研究气候因子或土地利用因子对湿地变化的影响, 以及二者交互作用, 来定量分析湿地变化驱动因子

的作用, 以期为更加深入了解西辽河流域自然湿地的演化过程, 以及推断控制湿地生态系统变化的可能机制提供科学依据, 为湿地农业综合开发和可持续发展提供科学参考。

1 地理位置与范围

西辽河流域地处中国北方农牧交错带的东缘, 是中国重要的农牧业生产基地, 主要区域在内蒙古自治区境内, 小部分边缘区域位于吉林省、辽宁省和河北省境内, 其干流长 312.69 km, 水流方向为自西向东, 最后汇入辽河, 流域内较大的支流有西拉木伦河、教来河、老哈河等。该流域北、西、南 3 面环山, 东临辽河平原, 地势由西向东逐渐降低, 海拔在 82~2 054 m (图 1)。流域内植被属温带草原区, 自然植被主要是典型草原植被、乔木、灌木、半灌木草原植被, 农作物为一年一熟, 以玉米、大豆、小麦为主。该区域属温带大陆性气候, 主要气候特征为干旱少雨, 年蒸发量大于水分补给量, 年平均气温 6.32 °C, 年降水量 382.00 mm, 年蒸发量 1 228.94 mm。

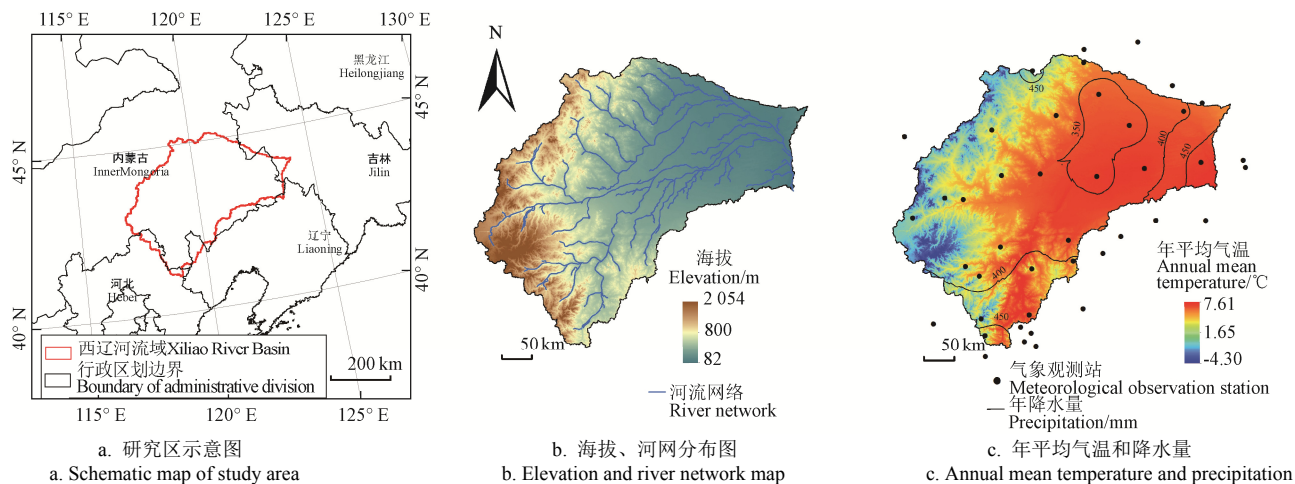


图 1 研究区位置、海拔、河网、年平均气温和降水量情况

Fig.1 Location, altitude, river network, annual mean temperature and precipitation of the study area

2 材料及研究方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 气象数据

气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 气温和降水数据来源于“1981—2010 年中国地面累年值日值数据集”的西辽河流域及周边 50 km 缓冲区内的气象观测站数据, 其中年平均气温采用线性回归方式将观测站点数据转为面数据, 在 SPSS 软件的支持下, 以年平均气温为因变量, 以观测站的经度、纬度和海拔为自变量建立一元线性回归方程, 样本数为 42 个; 年降水量在 Arcgis 软件的支持下, 利用 IDW 方法插值。

1951—2018 年气象数据选取西辽河流域内的观测站点数据, 气象要素为气温、降水量、相对湿度、平均风速、气压、蒸发量、日照时数等, 利用 SWAT 模型自带天气发生器 (WXGEN) 生成气候数据, 并且填补缺失数据。ARCSWAT 模型生成的各子流域气温、降水、径流

量等, 用于分析西辽河流域湿地变化的影响因素。

2.1.2 数字高程模型

将数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 导入 ARCSWAT 模型中进行流域划分、坡度和坡向提取等, DEM 为 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 地形产品 V4.1 版本数据, 空间分辨率 90 m, 该版本由国际热带农业中心 (International Center for Tropical Agriculture, 简称 CIAT) 利用新的插值算法得到的 SRTM 地形数据, 此方法填补了 SRTM 90 的数据空洞。数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>)。本研究将获取的数据转为 Asia North Albers Equal Area Conic (以下简称 Albers) 投影。

2.1.3 土地利用遥感监测数据

该数据主要用于在 ARCSWAT 模型中建立水文响应单元 (Hydrologic Response Units, HRU), 并作为土地利用类型变化分析的基础数据。数据来源于中国科学院资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)

的“中国土地利用现状遥感监测数据库”，该数据库是在国家科技支撑计划、中国科学院知识创新工程重要方向项目等多项重大科技项目的支持下，经过多年的积累而建立的覆盖全国陆地区域的多时相土地利用现状数据，目前该数据集包括 1980、1990、1995、2000、2005、2010、2015 年和 2018 年的土地利用遥感分类数据，数据生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源，通过人工目视解译生成，土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型以及 25 个二级类型，该数据集已经在国家土地资源调查、水文、生态研究中发挥着重要作用。

根据《湿地公约》^[17]对狭义湿地的定义，湿地包括沼泽、泥炭地、湿草甸、湖泊、河流、滞蓄洪区、河口三角洲、滩涂、水库、池塘、水稻田以及低潮时水深浅小于 6 m 的海域地带等，本研究结合西辽河流域地表覆盖特征，考虑到湿地分布的变化以及与其他地表覆盖物间交替作用形成的空间格局情况，简化非湿地地表类型，突出主要湿地类型，在“中国土地利用现状遥感监测数据库”的土地分类体系的基础上，确定一级土地覆盖分类和二级土地覆盖分类（表 1）。另外，为通过景观转换幅度分析西辽河流域干湿变化情况，根据土地覆盖类型的水分差异，再将表 1 中二级土地覆盖分类重新合并为 6 类，分别为耕地、林地、草地、水域、城乡-工矿-居民用地、未利用土地。

本文应用该数据集的 1 km 分辨率数据，并将 1980—2015 年数据转为 Albers 投影后，裁切为西辽河流域范围。

表 1 西辽河流域景观分类
Table 1 Landscape classification of Xiliao River Basin

一级土地分类 Primary land classification	二级土地分类 Secondary land classification	合并分类 Merge category
耕地 Cultivated land		水田，旱地
林地 Woodland		有林地，灌木林，疏林地，其他林地
草地 Grassland		高覆盖度、中覆盖度、低覆盖度草地
水域 Waters	河流	
	湖泊	
	水库坑塘	
	永久性冰川雪地	
	滩地	滩涂，滩地
城乡、工矿、居民用地 Urban and rural, industrial and mining, residential land		城镇用地，农村居民点，其他建设用地
未利用土地 Unused land	沼泽	
	其他未利用地	沙地、戈壁、盐碱地、裸土地、裸岩石质地、高寒荒漠、苔原等

2.1.4 归一化植被指数

植被指数的时间谱数据能够反映地表植被生长的动态过程^[18]，归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）数据来源于美国 EARTH DATA (https://earthdata.nasa.gov/) 数据中心的 MOD13A2 数

据集，该数据 Terra/MODIS 16 d 合成植被指数集，空间分辨率为 250 m，每隔 16 d 按照统一算法进行合成。由于数据的采集和处理过程中受到卫星传感器、太阳高度角和观测角度的影响，以及云、水汽、气溶胶等的干扰，即使采用了最大值合成法（Maximum Value Composite, MVC）合成数据，仍会出现不符合植被生长规律的奇异像元点，因此需进行平滑处理，本文采用时间序列谐波分析法（Harmonic Analysis of Time Series, HANTS）对时间谱数据进行平滑。其核心算法是傅立叶变换和最小二乘法拟合，即将时间谱数据分解成有限个谐波（正弦波或余弦波），从中选取若干个能反映影像时序特征的谐波进行叠加，达到重构时序数据的目的^[19]。

2.1.5 植被总初级生产力

植被总初级生产力（Gross Primary Productivity, GPP）是单位时间内植物通过光合作用途径所固定的有机碳量（kg/m²，本研究将单位转换为 g/m²。），是地表碳循环的重要组成部分^[20]，本研究选用 EARTH DATA 数据中心的 MOD17A2H 数据集，该数据为 8 d 合成产品，原始空间分辨率为 500 m。

2.1.6 流量观测数据

由于河流上游人为干扰相对较小，因此本研究选择西辽河上游的水文站流量观测站点的数据率定 SWAT 模型参数，3 个观测站分别为巴林桥（118.62°E，43.25°N）、兴隆坡（119.42°E，42.33°N）和新店（118.71°E，452.34°N），观测数据为月平均径流量（m³/s），数据时间范围为 1995—2011 年。

2.1.7 水系分布数据

将研究区已有的河网水系分布图输入到 SWAT 模型，从而更好地生成与实际较符合的河网水系。数据来源于中国科学院资源环境数据云平台（http://www.resdc.cn/Default.aspx）的“中国水系流域空间分布数据集”。

2.1.8 土壤数据

土壤数据是 SWAT 模型的主要输入参数之一，本研究首先根据中国科学院资源环境数据云平台的中国土壤类型空间分布数据库确定研究区土壤类型分布，再从中国土壤数据库（http://vdb3.soil.csdb.cn/）的中国土种数据库中查询每个土壤类型的初始信息，应用 1stOpt 软件，采用三次样条插值方法将国际制土壤粒径级配，转换为 USDA 标准，应用 SPAW 软件中的 Soil Water Characteristics 模块，根据土壤中黏土、砂土、有机质等含量来计算 SWAT 土壤数据库中所需的土壤湿密度（SOL_BD）、有效持水量（SOL_AWC）、饱和导水率（SOL_K）等参数。

2.2 模型及方法

本研究基于 SWAT 模型，首先划分西辽河流域的地理范围，并根据 SWAT 模型模拟的子流域气温、降水量、蒸散量、径流量等数据，结合土地利用分类数据，分析西辽河流域湖泊面积、沼泽湿地面积、河流流量变化的影响因素，并借助地理探测器，定量分析各个影响因素的驱动能力。

2.2.1 SWAT 模型及运行

SWAT 模型 (Soil and Water Assessment Tool) 由美国农业部 (USDA) 的农业研究中心 1994 年开发, 基于 GIS 基础之上, 具有长时段模拟能力的流域分布式水文模型, 能够在大流域复杂多变的土壤类型、土地利用方式和管理措施条件下, 预测土地管理对水分、泥沙和化学物质的长期影响。ArcSWAT 扩展模块是 SWAT 模型在 ArcGIS 平台上的图形用户界面^[21], 在研究气候变化、土地利用变化等因素对水文循环的影响方面得到较多应用。本研究应用 Arcgis 环境下的 ArcSWAT2012 模块进行水文过程的模拟。

1) 西辽河流域划分

西辽河流域目前尚没有统一明确的边界, 常根据研究需要划分范围, 且均未明确划分标准。早期多数以行政边界划分, 如孙小舟等^[22-23]、王耕等^[24]划分的边界, 后期中国科学院发表的一些文章没有根据行政边界划分, 如杨艳昭等^[25]、Feng 等^[26]划分的范围。也有学者基于 DEM, 利用分形维数和河网密度双重指标共同确定汇流累计阈值的方法提取西辽河流域河网水系^[27]。

本研究利用 ArcSWAT 扩展模块, 基于 SRTM V4.1 版本空间分辨率为 90 m 的地形产品数据, 以中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 提供的中国 1:400 万河流空间分布数据集为参考, 调整最小子流域面积为 500 km² 划分西辽河流域, 最终确定西辽河流域面积为 13.82 万 km²。经对比, 划分结果与靳晓辉等^[27]的划分结果具有较高的一致性, 具体如图 1。

2) SWAT 模型最佳子流域划分

SWAT 模型的子流域划分是构建模型的前提基础, 子流域划分数量直接影响汇水面积、河网密度以及模型的计算效率, 子流域划分数量越多, 其平均汇水面积越小, 河网密度越大, 越能细致地反映地形空间的变化, 但模型的计算时间会增加。许多研究者针对这一问题在不同的地形和气候条件下分析了子流域划分数量与径流模拟精度之间的关系, 结果表明, 一定范围的子流域划分数量对地表径流影响不大^[28-30], 但模拟的环境不同, 这一范围并没有统一的标准。为找到研究区内子流域的最佳划分数量, 本研究以 1980 年为例, 将汇水面积在 250~3 200 km² 之间设定了对应的 16 个子流域划分方案, 在其他条件相同的情况下, 利用 SWAT 模型模拟年径流量, 并计算年均径流深, 结果表明随着子流域数量的变化, 年均径流深在 2.65~3.20 mm 之间波动, 子流域数量在 37~63 之间时年均径流深模拟结果比较稳定, 因此选取该区间的中间数 51 为子流域划分数量。

3) SWAT 模型参数率定

本研究利用巴林桥、兴隆坡和新店 3 个水文站的月径流量数据, 采用水量平衡校准方式的多站点校准方法, 对 Swatcup 软件默认的 13 个参数进行率定, 选用 SUFI-2 算法进行运算。利用 2000 年土地利用数据, 设 1995—1997

年为预热期, 1998—2004 年为率定, 2005—2011 年为验证期, 参考 Moriasi 等^[31]对水文模拟精度判别方法, 认为均方根误差与标准误差比率 (RSR) 在 0.0~0.7 之间、纳什效率系数 (NSE) 在 0.5~1.0 之间、百分比偏差 (RBIAS) <25.0 时, 模型模拟效果较好。

表 2 西辽河流域 3 个水文站月净流量模拟效果评价

Table 2 Simulation results of monthly net flow of three hydrological stations in Xiliao River Basin

模拟 Simulation	巴林桥 Balinqiao			兴隆坡 Xinglongpo			新店 Xindian		
	RSR	NSE	RBIAS/%	RSR	NSE	RBIAS/%	RSR	NSE	RBIAS/%
率定期 Parametric rate period	0.51	0.74	24.86	0.18	0.97	24.68	0.38	0.86	16.59
验证期 Verification Period	0.56	0.68	22.74	0.18	0.97	23.43	0.49	0.76	19.99

注: RSR 为均方根误差与标准误差比率; NSE 为纳什效率系数; RBIAS 为百分比偏差。

Note: RSR is ratio of the root mean square error to the standard deviation of measured data; NSE is Nash-Sutcliffe Efficiency; RBIAS is percent bias.

RSR 是从最优值 0 到一个较大的正值, RSR 越低, 模型的模拟效果越好, 表 2 中 3 个水文站的率定期 RSR 普遍小于验证期, 其中兴隆坡最低, 新店略高, 已达到 Moriasi 等^[31]划分的最好级别, 巴林桥在好的级别; NSE 是一种标准化统计指标, 是剩余方差 (噪声) 与实测数据方差 (信息) 的比较, 表示观测数据与模拟数据在图形形式上的吻合程度, $NSE \in (-\infty, 1]$, NSE 越大, 模型的模拟效果越好, 表 2 中 3 个水文站的率定期 NSE 普遍大于验证期, 其中兴隆坡和新店的模拟效果达到了最好级别, 巴林桥达到满意级别; RBIAS 用来对比模拟数据与观察数据的偏差, 以百分数表示, PBIAS 值越小, 模型模拟越准确, 表 2 中 3 个水文站的 RBIAS 均达到满意级别。由此可见, 参数率定后的 SWAT 模型在西辽河流域具有较好的适用性。

4) SWAT 模型模拟

SWAT 模型运行时所用的土地利用数据依据邻近原则输入 (表 3), 模拟 1980—2015 年西辽河流域径流量和产水量的时间序列。

表 3 SWAT 模型所用土地利用年份与对应模拟时期

Table 3 Land use years and corresponding simulation period used in SWAT model

序号 Serial No.	土地利用年份 Year of land used	模拟时期 Simulated period	序号 Serial No.	土地利用年份 Year of land used	模拟时期 Simulated period
1	1980	1975—1983	5	2005	2003—2007
2	1990	1984—1992	6	2010	2008—2012
3	1995	1993—1997	7	2015	2013—2015
4	2000	1998—2002			

2.2.2 景观转换分析

本研究定义, 西辽河流域土地覆盖类型的景观转换幅度是指湿地景观在转化过程中, 一种景观类型向其他景观类型转换的程度, 计算公式如下:

$$M = \sum \{ (j-i) \cdot s_{ij} \}$$
 (1)

式中 M 为景观转换幅度, s_{ij} 为不同年份景观变化转移矩阵中的转化面积; i 和 j 分别为第 i 类景观类型和第 j 类景观类型; $(j-i)$ 为转换系数, 该转换系数的设定参照张玉红等^[6]的方法, 如果景观转换幅度大于 0, 说明景观向湿润方向发展, 反之, 说明景观向干旱方向发展, 土地覆盖类型相似的景观转换系数 $(j-i)$ 的绝对值较小, 土地覆盖类型差别大的景观转换系数 $(j-i)$ 的绝对值较大, 具体如表 4。

表 4 西辽河流域景观转换系数

Table 4 Landscape conversion coefficient of Xiliao River Basin						
转换系数 Conversion coefficient	湖泊、 河流和 水库 Lake, river and Reservoir	沼泽 Bog	林地 Woodland	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	滩涂、城乡、工 矿、居民用地和 未利用地 Mudflat Urban and rural, industrial and mining, residential land and Unused land
湖泊、河流 和水库	0	1	2	3	4	5
沼泽	-1	0	1	2	3	4
林地	-2	-1	0	1	2	3
草地	-3	-2	-1	0	1	2
耕地	-4	-3	-2	-1	0	1
滩涂、城乡、 工矿、居民 用地和未利 用地	-5	-4	-3	-2	-1	0

以景观转换系数作为主要的景观变化指标来分析西辽河流域内部景观动态的变化类型。具体方法是首先将不同年份的景观类型图进行两两叠加, 确定每个栅格的景观转换系数值, 利用统计学方法对全部栅格单元的景观转换系数的时间变化序列进行统计, 得出西辽河流域景观转换幅度和转换方向。

2.2.3 地理探测器原理与应用

地理探测器方法通过研究目标因子的分异特征, 同时探测因子及其交互作用的影响实现度量单因子或两因子交互作用的驱动效应。该模型的核心是解释影响因子对目标因子空间分异的解释程度, 用 q 值度量, 具体表达式为^[32]

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中 $h=1, 2, \dots, L$; L 为影响因子的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区目标值的方差。 q 的值为 $[0, 1]$, q 值越接近 1, 表示影响因子的主导驱动作用越强, 该软件也能够检验 q 值的显著性。

地理探测器的输入变量要求是类别数据, 需要把连续型变量做离散化处理。本研究将每个子流域各个时期的降水变化量 (X_1)、蒸散变化量 (X_2)、湖泊 (沼泽)

转为其他土地利用类型的面积 (X_3)、其他土地利用类型转为湖泊 (沼泽) 的面积 (X_4), 借助 SPSS 的 K-平均值聚类方法分为 10 类, 对应湖泊 (沼泽) 面积变化量作为 Y , 计算单因子或两两因子组合对湖泊 (沼泽) 面积变化的贡献率; 同样将流量变化量作为 Y , 计算降水变化量 (X_1) 和蒸散变化量 (X_2) 对流量变化量的单因子贡献和组合贡献。

3 结果与分析

3.1 西辽河流域湿地变化特征

3.1.1 湿地面积变化特征

西辽河流域主要的自然湿地为湖泊、河流和沼泽, 其中湖泊面积较小 (图 2a), 1980—2015 年平均值为 607.14.00 km², 呈现先上升 (1980—1990 年) 后下降 (1990—2015 年) 的过程; 沼泽面积较大 (图 2b), 平均值为 2657.00 km², 1980—1995 年间下降趋势明显, 2000 后下降趋势减缓; 1980 年以来西辽河流域径流深在 8.52~164.95 mm 之间, 平均为 48.46 mm, 年际间波动较大, 无明显变化趋势,

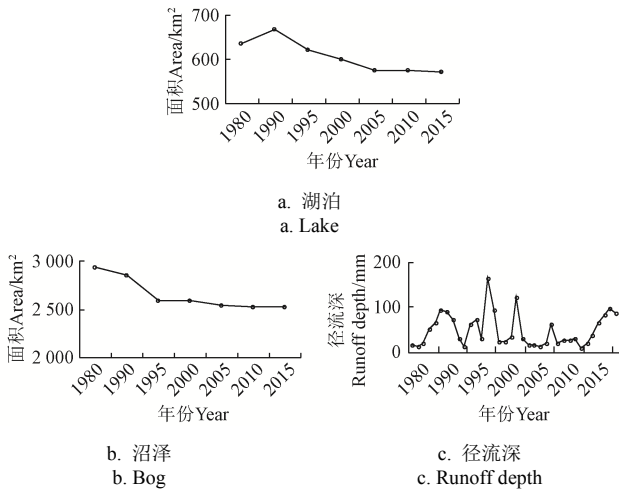


图 2 1980—2015 年西辽河流域湿地面积变化

Fig.2 Variation of wetland area in the Xiliao River Basin during 1980—2015

表 5 为西辽河流域湖泊和沼泽与其他土地利用类型的面积转化情况, 分析可知, 湖泊面积减小的主要原因是耕地侵占, 6 个时期耕地累积侵占湖泊面积最大 (为 57.00 km²), 除 1995—2010 年外, 其余时期均有耕地侵占湖泊的现象, 而其他土地利用类型在不同时期与湖泊相互转化, 如未利用地在 1990—1995 年、2000—2005 年和 2010—2015 年分别侵占湖泊 9.00、5.00 和 1.00 km², 在其他时期有 1.00~26.00 km² 的未利用地转为湖泊。

分析沼泽与其他土地利用类型之间转化的数据可见, 耕地仍然是侵占沼泽的主要土地利用类型, 6 个时期累积侵占沼泽 350.00 km², 草地、林地、城乡-工矿-居民用地、湖泊和滩涂分别累积侵占草地 76.00、44.00、10.00、8.00 和 4.00 km², 未利用地是沼泽面积增加的主要贡献者, 累积转化为沼泽 69.00 km²。

表 5 西辽河流域湖泊和沼泽与其他土地利用类型的面积转化

Table 5 Area transformation of the lakes and bog with other land use types in the Xiliao River Basin km²

土地类型 Land type	年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	河流 River	湖泊 Lake	水库坑塘 Reservoir Pit	滩地 Beach Land	城乡、工矿、居民用地 Urban and rural, industrial and mining, residential land	沼泽 Bog	其他未利用地 Other unused land
湖泊 Lake	1990	-18	3	13	-5	0	-2	-1	0	39	5
	1995	-6	-3	5	1	0	-1	2	-11	-26	-9
	2000	-17	-3	-27	1	0	2	0	-3	1	26
	2005	-14	0	1	0	0	0	0	-1	-6	-5
	2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
	2015	-2	-1	-1	1	0	0	0	0	0	1
沼泽 Bog	1990	-13	-12	-61	5	-39	-9	-7	19	0	43
	1995	-159	-26	-3	-11	26	4	13	-32	0	-79
	2000	-70	-4	-32	4	-1	-2	-10	3	0	106
	2005	-100	-2	19	3	6	21	0	0	0	0
	2010	-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2015	-3	0	1	0	0	1	0	0	0	-1

注：正值为由某种土地覆盖类型转化为湖泊（沼泽），负值为由湖泊（沼泽）转化为其他土地覆盖类型。
Note: Positive value is the conversion of one land cover type into lake (bog), negative value is the conversion of lake (bog) into other land cover types.

3.1.2 景观转换特征

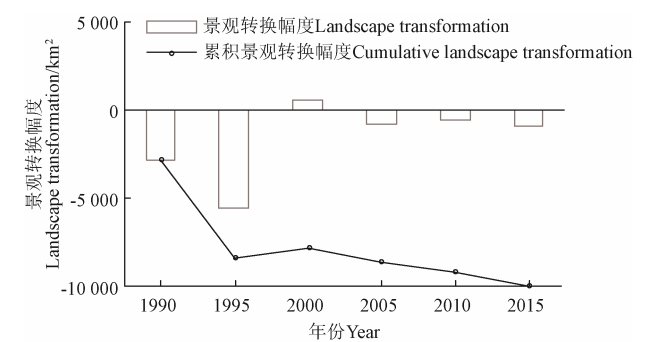
从景观转换幅度的变化过程看（图 3），西辽河流域 1980 年以来总体上向干生生境方向发展。西辽河流域景观转换在 1980—2015 年间大致分为 3 个阶段，第 1 个阶段为 1980—1995 年间，流域景观转换幅度较大，其中 1980—1990 年间为 -2 866 km²，1990—1995 年间为 -5 491 km²，湿地的转换幅度均小于 0，说明这个阶段的土地覆盖类型转化是向干生生境方向发展，并且转换幅度较大，累积转换幅度高达 -8 357 km²；第 2 阶段为 1995—2000 年间，全流域的转换幅度大于 0（为 531 km²），说明全流域的转化向干生生境方向发展，但转换幅度相对前一时时期变小，因此景观累积转换幅度仍处于较低水平（-7 826 km²）；第 3 阶段为 2000—2015 年间，全流域的转换幅度又开始小于 0，说明全流域的转化方向又开始向干生生境发展，转换幅度接近于 1995—2000 年间，介于 -505~857 km²之间，从而导致累积转换幅度进一步下降。

3.1.3 沼泽植被变化特征

2000—2015 年西辽河流域沼泽植被生长季（4—10 月）NDVI 和年 GPP 均存在极显著的上升趋势（图 4），其中 NDVI 介于 0.21~0.36 之间，平均为 0.30，变化倾向率为 0.07/(10 a)；GPP 介于 213.12~257.73 g/(m²·a)，平均为 257.73 g/(m²·a)。

西辽河流域生长季 NDVI 平均值存在较明显的区域差异（图 5a），NDVI 较高的区域集中分布在哈尔滨郭勒河流域和西辽河干流下游区域，生长季平均 NDVI 超过了 0.30，同时 NDVI 均呈上升趋势，其中增加速率较快的区域则主要在老哈河中游、查干木伦河中游和新开河中游的部分区域（图 5b），年平均增加 0.01，而且均呈极显著增加趋势（ $p<0.01$ ）；年 GPP 平均值高低的分布特征（图 5c）与生长季 NDVI 在空间上具有较好的对应性，但 NDVI 和 GPP 的变化趋势的空间一致性较差，部分子流域 GPP 的变化存在弱的下降趋势

（ $p\geq0.05$ ，图 5d），相同子流域的 NDVI 存在一定的上升趋势。



注：景观转换幅度为西辽河流域景观干湿转换的净变化量，累积景观转换幅度为景观转换幅度的累计量，>0 表示处于湿生生境，<0 表示处于干生生境。曲线上表示向湿生生境发展，下降意味着向干生生境发展。
Note: The landscape conversion range is the net change of landscape dry-wet conversion in the Xiliao River Basin. The cumulative landscape conversion range is the cumulative amount of the landscape conversion range, > 0 means in wet habitat, < 0 means in dry habitat. The rise of the curve indicates the development to wet habitat and the decrease of the curve means the development to dry habitat.

图 3 1980—2015 年西辽河流域景观转换幅度

Fig.3 Landscape conversion extent of Xiliao River Basin from 1980 to 2015

3.2 西辽河流域气候变化特征

为了解研究时段（1980—2015 年）的气候变化趋势与气候背景（有气象记录以来的气候变化规律：1951—2018 年）之间的关系，对比分析了西辽河流域的 1951—2018 年和 1980—2015 年的年平均气温和年降水量的变化趋势。分析可见，1951—2018 年西辽河流域年平均气温介于 6.59~11.10 ℃之间，平均为 8.88 ℃，并存在极显著上升趋势（图 6a），气候变化倾向率为 0.3 ℃/(10 a)；1980—2015 年间，年平均气温介于 7.91~11.10 ℃，平均为 9.32 ℃，与 1951—2018 年相比，年平均气温增加了 0.44 ℃，年平均气温波动有所减小，气候变化趋势与 1951—2018 年几乎一致，气候变化倾向率相同。

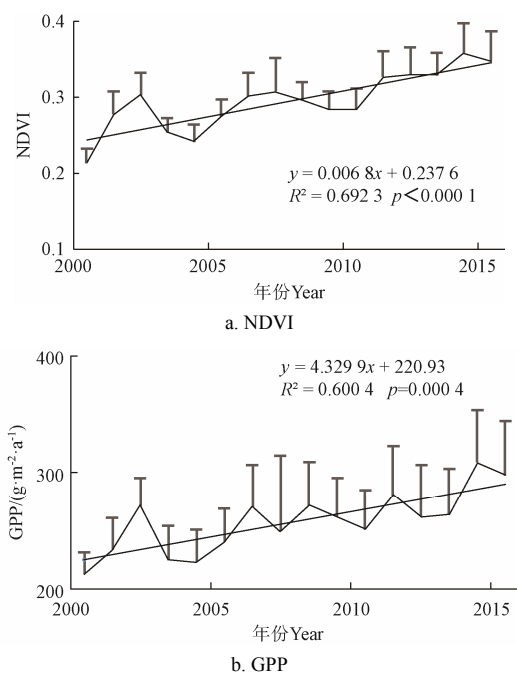


图4 2000—2015年西辽河流域沼泽植被NDVI和GPP变化

Fig.4 Variation of NDVI and GPP of bog vegetation in the Xiliao River Basin during 2000—2015

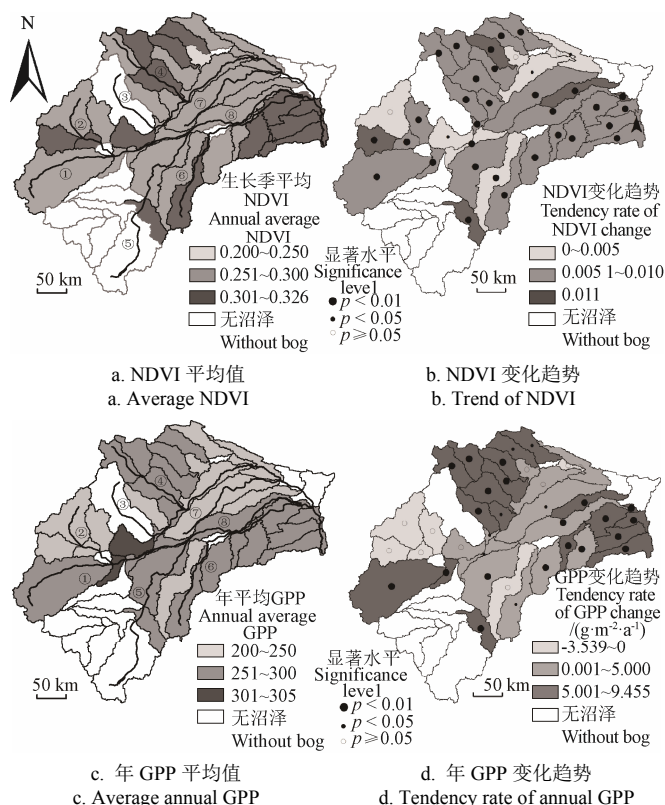
分析年降水量可知(图6b), 1951—2018年降水量介于255.75~528.38 mm之间, 年降水量平均为377.6 mm, 存在较弱的下降趋势; 1980—2015年降水量介于257.49~511.35 mm之间, 平均为372.84 mm, 略低于1951—2018年, 下降趋势较1951—2018年明显, 但仍未达到显著性水平。

3.3 西辽河流域湿地变化的影响因素

3.3.1 单因素对湿地变化的影响

将西辽河流域划分为51个子流域, 分析降水量、蒸散量、土地利用变化对西辽河流域内的湖泊面积、沼泽湿地面积、河流流量变化的影响, 其中土地利用变化因子分别为各个时期内子流域湖泊(沼泽)增加的面积(由其他土地利用类型转移为湖泊/沼泽的面积)和减少的面积(湖泊/沼泽转为其他土地利用类型的面积)。因各变量之间的量纲差异较大, 所以将各变量归一化运算后再进行比较分析, 统计分析发现, 土地利用变化因子与湖泊(沼泽)变化面积未达到显著相关关系, 因此将图省略。由图7可见, 湖泊面积的变化与降水量变化、湖泊面积的变化与蒸散量变化均呈极显著的线性正相关关系, 降水量和蒸散量变化大, 湖泊面积的变化也随之增大, 降水量和蒸散量的变化对湖泊面积变化的驱动能力 q 值分别为0.5897和0.6696。湖泊面积变化量主要集中在-19.28~11.62 km², 与之对应的降水量变化在-300.95~295.02 mm之间, 蒸散量变化在-784.68~690.33 mm之间。

沼泽面积的变化与降水量变化、蒸散量变化极呈极显著的二次曲线关系, 降水量和蒸散量的变化对沼泽面积变化的驱动能力 q 值分别为0.8861和0.8298。根据拟合曲线公式计算, 降水量变化在200 mm左右是沼泽面积



注: ①~⑧分别代表西拉木伦河、查干木伦河、乌吉木伦河、哈尔滨郭勒河、老哈河、教来河和西辽河干流。

Note: ①~⑧ stand for the main stream of the Xila Morun River, Chagan Morun River, Ujil Morun, Ha'er Gol River, Laoha River, Jiaolai River and Xiliao River respectively.

图5 2000—2015年西辽河流域生长季NDVI年GPP变化趋势

Fig.5 Tendency of NDVI and annual GPP during the growing season in the Xiliao River Basin from 2000 to 2015

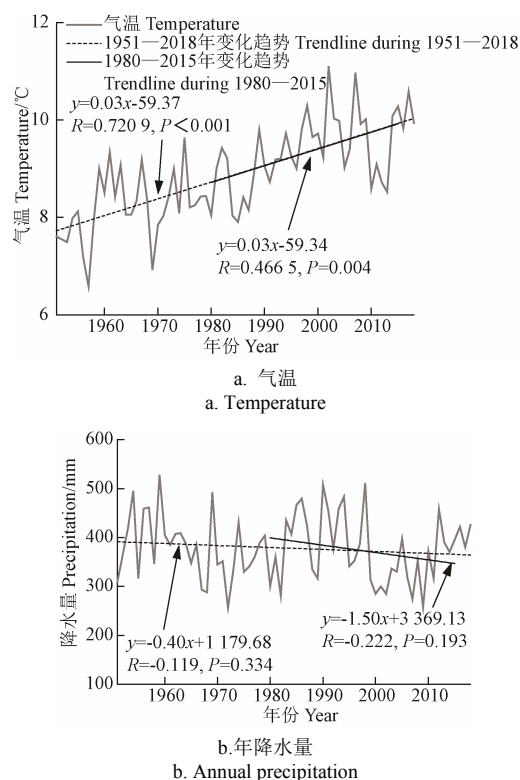


图6 1951—2018年西辽河流域年平均气温和年降水量变化

Fig.6 Variation of annual average temperature and annual precipitation in Xiliao river basin from 1951 to 2018

变化的拐点, 即当降水量减少或增加小于 200 mm, 沼泽面积虽降水量的增加而增加, 直到降水量增加大于 200 mm, 沼泽面积将随降水量的增加而减少, 分析原因发现, 因沼泽是陆地上潮湿积水、喜湿性植物大量生长并有泥炭堆积的地方, 如果当年降水量过大, 部分沼泽会呈现出湖泊的地貌特征, 因此在遥感分类时会把这部分区域划分为湖泊, 为验证以上分析的准确性, 本研究将图 7c 中降水量增加超过 200 mm 的子流域的相邻两期遥感分类栅格图进行对比, 发现的确有湖泊侵占沼泽的现象。根据图 7d 的拟合曲线公式计算, 蒸散量变化在 500 mm 左右是沼泽面积变化的拐点, 图 7d 中 85.24% 的蒸散量变化超过 500 mm 的地点, 降水量超过 200 mm (图 7c), 分析降水量变化与蒸散量变化的相关关系发现, 二者呈极显著的线性相关关系 ($R^2=0.6747$, $P<0.0001$, $n=306$), 可见, 降水量变化大, 蒸散量变化也随之增加。

河流径流量的变化与降水量变化 (图 7e)、与蒸散量变化 (图 7f) 均呈极显著的线性正相关关系, 降水量和蒸散量变化大, 河流径流量的变化也随之增大, 降水量和蒸散量的变化对河流径流量变化的驱动能力 q 值分别为 0.6471 和 0.5932。但在降水量变化区间为 $[-300, 300]$ 时, 部分河流的径流量变化与降水量变化无明显的相关性, 分析原因可能与该流域水利工程对水文变化的影响有关。

分析沼泽植被 NDVI 与年平均气温、生长季平均气温、年降水量和生长季降水量的相关关系发现, 只有生长季平均气温与二者之间存在显著的相关性 (图 7g 和图 7h), 而且均为线性正相关关系, 说明热量因素对西辽河流域沼泽植被的生长影响具有一定的规律性, 而未发现水分因素影响规律, 分析原因可能是研究对象为生长在沼泽的植被, 水分条件未对植被生长产生明显的制约作用。

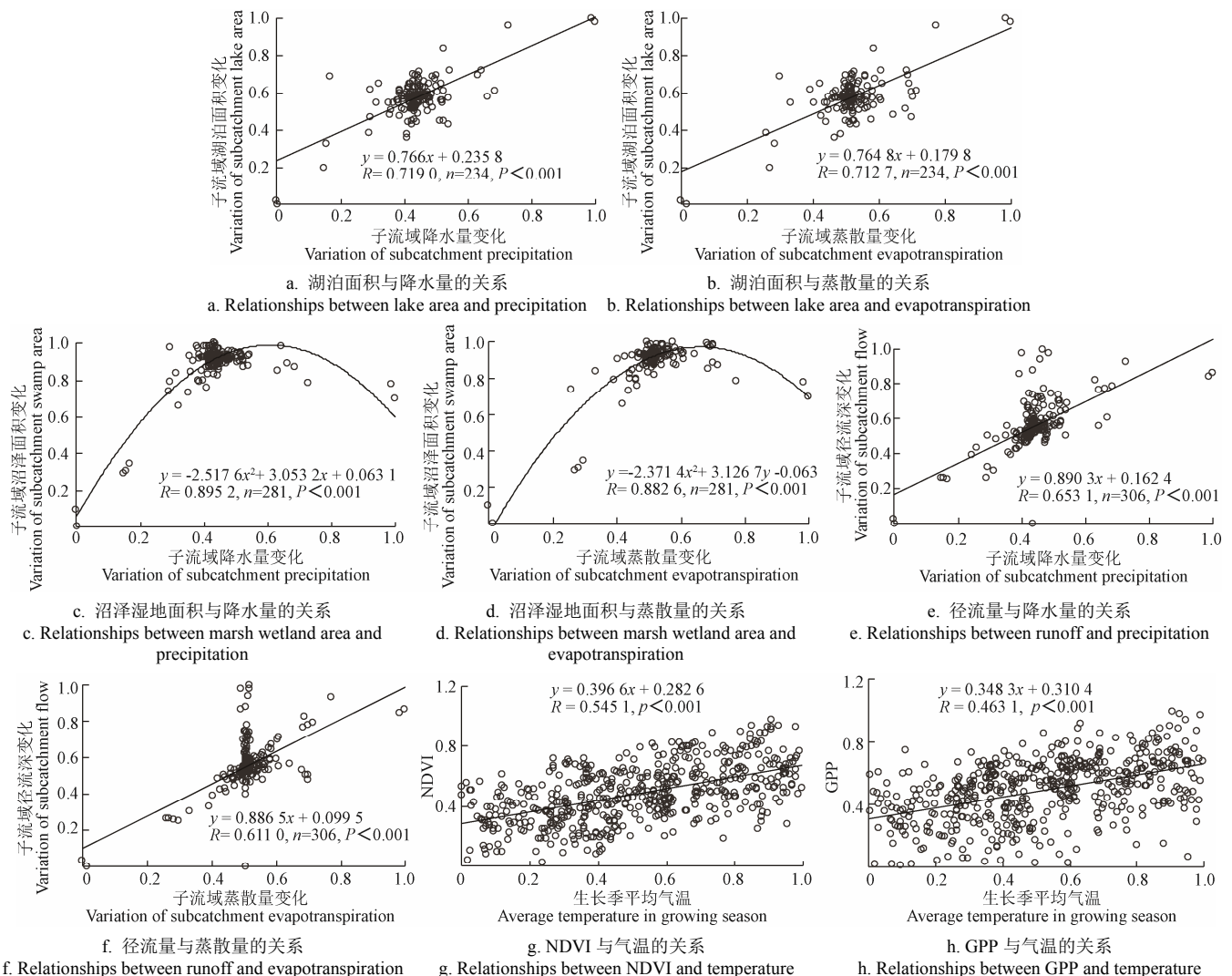


图 7 1990—2015 年西辽河子流域的湖泊面积变化与气象因子之间的关系

Fig.7 Relationship between lake area change and meteorological factors in Xiliao River subcatchment from 1990 to 2015

3.3.2 两两因子交互作用的影响

交互作用探测结果表明, 对于 3 种湿地类型, 其影

响因子两两交互作用均会增强对面积 (流量) 变化的解释力, 但不同湿地类型内主导交互作用类型有差异, 将

驱动能力排在前 3 位的交互作用方式列入表 5, 分析可见, 交互作用排在前两位的均为降水量与某一影响因子的协同作用, 驱动能力 q 值均超过 0.70, 可见降水是湿地变化的主要控制因子; 排在第三主导交互作用的是土地利用类型面积的变化与某一影响因子的协同作用。

根据土地利用类型转化分析结果可知, 侵占湿地主要土地利用类型是耕地, 因此可以将湿地面积变化因素归为人类对湿地面积变化的影响因素, 同时, 西辽河流域处于半干旱地区, 耕地有效灌溉面积超过 40%, 耕地灌溉用水量巨大, 可以将耕地面积变化因素归为人类对河流流量变化的影响因素。对应表 6 的分析结果可见, 自然因素是湿地面积变化或河流流量变化的主要影响因素, 人类活动因素的影响要小于自然因素, 其中自然因素的解釋力由大到小的排序为: 沼泽面积变化、湖泊面积变化和河流流量变化。

表 6 不同因子交互作用分析
Table 6 Analysis of interaction of different factors

	湖泊面积变化 Lake area change	沼泽面积变化 Swamp area change	流域径流深度变化 Basin runoff depth change
主导交互作用 1 Dominant Interaction 1	降水量∩湖泊 减少面积	降水量∩蒸散 量	降水量∩蒸散量
q	0.770	0.934	0.708
主导交互作用 2 Dominant Interaction 2	降水量∩蒸散 量	降水量∩沼泽 减少面积	降水量∩耕地面积 变化
q	0.764	0.922	0.687
主导交互作用 3 Dominant Interaction 3	蒸散量∩湖泊 增加面积	降水量∩沼泽 增加面积	蒸散量∩耕地面积 变化
q	0.746	0.909	0.395

4 讨 论

本研究表明, 西辽河流域湿地生态系统的压力主要通过水文和土地利用变化来调节, 这与 Ferrati 对阿根廷东北部 Esteros del Ibera 地区的研究结论具有极高的相似性^[33]。气候变化可能通过改变流域水文制度对湿地产生显著影响^[34-35], 降水是最直接的气候因素, 而其他气候因素包括温度升高和蒸发蒸腾作用的改变, 也可能直接或间接地发挥重要作用。气候预测模型普遍认为, 北半球高纬度地区将是温室效应增强最可能发生的区域^[36-37], 由于气温升高导致的蒸发蒸腾量增加, 不仅会导致湿地斑块本身的水分流失, 而且也会减少湿地所在集水区水分的供应, 另外, 气候变暖使季节性冻土存留时间缩短和分布格局改变^[38-39], 会导致地下水位下降^[40], 这些将对现有湿地产生不利影响。

土地利用的改变被认为是湿地退化最直接的人为干扰因素^[41-42], 从本研究的结果可见, 西辽河流域湿地集中分布区域与农田紧密相邻, 耕地侵占是该流域湖泊和沼泽面积减少的主要原因之一, 1980—2015 年间的 6 个时期耕地累计侵占湖泊 57.00 km², 侵占沼泽 350 km², 而且这种侵占几乎是不可逆的, 与此同时, 耕地与其他土地利用类型互有转化, 因此在分析湖泊和沼泽面积变化与土地利用影响因素的相关性时, 湿地面积变化与土地利用变化的相关性要远远低于与降水量的相关性。

虽然气候变化可能是湿地退化的主要因素, 但目前土地管理和水利措施可能会加剧这种影响, 例如放任耕地对湿地的侵占、农业灌溉用水、在河流上修建水库等, 遇到干旱年份, 大量的农业灌溉用水和生活用水降低了河流的基础流量, 减少了本应补给湿地的水分, 加上干旱年份蒸发蒸腾量较常年高, 更加剧了湿地的萎缩, 这种情况在许多干旱、半干旱地区很常见^[43-44]。

本研究结果表明, 1980 年以来湿地植被 NDVI 和 GPP 均呈现出极显著上升趋势, 与湿地萎缩的结论相悖, 原因与计算方法有关, 在计算 NDVI 和 GPP 时仅针对当年湿地本身的植被, 如果在第二年有部分湿地转为其他土地利用类型, 将不在统计范围内。影响植被生长的最重要的 2 个外因是温度和水分, 水分不是生活在沼泽湿地植被的主要限制因子, 2000 年以来气温的显著升高给植被 NDVI 和 GPP 创造了有利条件, 因此出现了西辽河流域湿地总体面积在萎缩, 而沼泽湿地植被长势转好的现象。

本研究虽然利用 SWAT 模型刻画了每个集水区內河流流量、降水量和气温以及与之对应区域内湖泊和沼泽面积的变化, 探寻西辽河流域湿地变化的气候和人为影响机制, 但由于河流流量观测数据有限, 而且缺乏水库、人工河渠等水利设施数据, 对 SWAT 模型参数率定及流量模拟的精度会产生一定影响, 后续研究需要进一步补充缺乏的资料, 或者寻找一种更为有效的订正方法, 使模型模拟结果更贴近事实。

5 结 论

- 1) 1980 年以来西辽河流域经历了干-湿-干的变化过程, 除 1995—2000 年间为湿生生境外, 其余时间均为干生生境。
- 2) 西辽河流域湿地退化明显, 湖泊和沼泽面积存在下降趋势, 沼泽植被的 NDVI 和植被总初级生产力 GPP 存在极显著上升趋势。
- 3) 湖泊面积的变化、径流深度变化与降水量变化、蒸散量变化均呈极显著的线性正相关关系, 沼泽湿地面积变化与以上 2 个因素呈极显著的二次曲线关系, NDVI 和 GPP 与生长季积温呈极显著的线性正相关关系。
- 4) 单因子驱动作用分析表明, 降水量是西辽河流域湿地变化的主要控制因子, 降水量和蒸散量对湿地变化的驱动能力由大到小的顺序均为沼泽面积、河流径流量、湖泊面积。
- 5) 两两驱动因子交互作用分析发现, 降水量与蒸散量或与土地利用因子的协同作用对湖泊、沼泽和径流深度的驱动能力高于单因子的驱动作用, 总体上自然因素对湿地变化的影响要大于人为因子。

[参 考 文 献]

[1] Jorgensen S E, Xu F L, Salas F, et al. Application of indicators for the assessment of ecosystem health. Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health, 2005, 27: 55-66.

- [2] Saintilan N, Rogers K, Kelleway J J, et al. Climate change impacts on the coastal wetlands of australia[J]. *Wetlands and Climate Change*, 2019, 39: 1145-1154.
- [3] Ellis C J, Rochefort L. Long-term sensitivity of a High Arctic wetland to Holocene climate change[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94(2): 441-454.
- [4] Gedney N, Huntingford C, Comyn-Platt E, et al. Significant feedbacks of wetland methane release on climate change and the causes of their uncertainty[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(8): 084027.
- [5] Neubauer S C, Verhoeven J T A. Wetland effects on global climate: Mechanisms, impacts, and management recommendations[J]. *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use*, 2019, 238(5): 39-62.
- [6] 张玉红, 苏立英, 于万辉, 等. 扎龙湿地景观动态变化特征[J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 131-142.
Zhang Yuhong, Su Liying, Yu Wanhui, et al. Characteristics of landscape dynamic changes in Zhalong Wetland[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 131-142. (in Chinese with English abstract)
- [7] Feng W J, Mariotte P, Xu L G, et al. Seasonal variability of groundwater level effects on the growth of *Carex cinerascens* in lake wetlands[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(1): 517-526.
- [8] Mantyka-Pringle C, Leston L, Messmer D, et al. Antagonistic, synergistic and direct effects of land use and climate on Prairie wetland ecosystems: Ghosts of the past or present?[J]. *Diversity and Distributions*, 2019, 25(12): 1924-1940.
- [9] Ott E T, Galbraith J M, Daniels W L, et al. Effects of amendments and microtopography on created tidal freshwater wetland soil morphology and carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(2): 638-652.
- [10] Yang R M. Interacting effects of plant invasion, climate, and soils on soil organic carbon storage in coastal wetlands[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(8): 2554-2564.
- [11] Cassatt M S, Wilcox D A. Potential effects of climate change on NRCS Wetland Restoration Easements: An ecohydrological assessment[J]. *Ecohydrology*, 2019, 13(2): 1-61.
- [12] Sirami C, Caplat P, Popy S, et al. Impacts of global change on species distributions: Obstacles and solutions to integrate climate and land use[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26: 385-394.
- [13] 杨玲, 杨艳昭. 基于 TVDI 的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(2): 76-81.
Yang Ling, Yang Yanshao. The spatial and temporal pattern of soil moisture in the west Liaohe river basin based on TVDI method and its influencing factors[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(2): 76-81. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭绍礼. 西辽河流域沙漠化土地的形成和演变[J]. *自然资源*, 1980(4): 46-52.
- [15] 红梅, 银山, 包玉海, 等. 内蒙古西辽河流域荒漠化分析研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 324-328.
Hong Mei, Yin Shan, Bao Yuhai, et al. Research for desertification analysis of West Liaohe River Basin of Inner Mongolia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 324-328. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴梦红. 西辽河流域湿地演变特征及其驱动力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Wu Menghong. Study on Wetland Evolution Characteristics and Driving Factor in West Liao River Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [17] Hawkins C F, Smith O E. The convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat[J]. *Environmental Policy and Law*, 1983, 10(2): 70-71.
- [18] 刘丹, 于成龙, 李帅, 等. 基于遥感的黑龙江省东部水稻种植信息提取[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(27): 30-34.
Liu Dan, Yu Chenglong, Li Shuai, et al. Rice planting extraction in northern heilongjiang province based on remote sensing[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(27): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郝卫平, 梅旭荣, 蔡学良, 等. 基于多时相遥感影像的东北三省作物分布信息提取[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 201-207.
Hao Weiping, Mei Xurong, Cai Xueliang, et al. Crop planting extraction based on multi-temporal remote sensing data in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(1): 201-207. (in Chinese with English abstract)
- [20] Croft H, Chen J M, Froelich N J, et al. Seasonal controls of canopy chlorophyll content on forest carbon uptake: Implications for GPP modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(8): 1576-1586.
- [21] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [22] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭, 等. 西辽河流域近 60 年来气候变化趋势分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 62-66.
Sun Xiaozhou, Feng Zhiming, Yang Yanzhao, et al. The climate change trend in Xiliao River Basin in recent 60 year[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(9): 62-66. (in Chinese with English abstract)
- [23] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭. 西辽河流域 1952 年-2007 年参

- 考作物蒸散量的变化趋势[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 479-484.
- Sun Xiaozhou, Feng Zhiming, Yang Yanzhao. Change tendency of reference crop evapotranspiration in Xiliaohe Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 479-484. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王耕, 吴伟. 基于 GIS 的西辽河流域生态安全空间分异特征[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 28-33.
- Wang Geng, Wu Wei. Assessment on ecological security spatial differences of west areas of Liaohe River based on GIS[J]. Environmental Science, 2005, 26(5): 28-33. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨艳昭, 杨玲, 张伟科, 等. 西辽河流域玉米水分平衡时空分布格局[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 147-152.
- Yang Yanzhao, Yang Ling, Zhang Weike, et al. The spatial and temporal distribution pattern of maize water balance in Xiliaohe river basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(4): 147-152. (in Chinese with English abstract)
- [26] Feng Z M, Yang L, Yang Y Z. Temporal and spatial distribution patterns of grain crops in the West Liaohe River Basin[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(3): 244-252.
- [27] 靳晓辉, 何俊仕, 董克宝. 基于 DEM 的西辽河流域河网水系提取研究[J]. 节水灌溉, 2014(10): 43-45.
- Jin Xiaohui, Hei Junshi, Dong Kebao. Research on drainage network extraction of Western Liaohe river basin based on DEM[J]. Water-saving Irrigation, 2014(10): 43-45. (in Chinese with English abstract)
- [28] Bingner R L, Gatzert J, Arnold J G, et al. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and sediment yield[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(5): 1329-1335.
- [29] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M, et al. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT[J]. Journal of American Water Resources Association, 2006, 42(2): 513-528.
- [30] 李曼曼, 韩会玲, 刘晓英, 等. SWAT 模型最佳子流域划分方案研究: 以云南洱海流域为例[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 185-189.
- Li Manman, Han Huiling, Liu Xiaoying, et al. Study on optimal sub-division scheme of watershed using SWAT Model: A case study in Erhai Basin, Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(2): 185-189. (in Chinese with English abstract)
- [31] Moriasi D N J, Arnold G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASAE, 2007, 50(3): 885-900.
- [32] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [33] Ferrati R, Canziani G A, Moreno D R. Estero del Ibera: Hydrometeorological and hydrological characterization[J]. Ecological Modelling, 2005, 186(1): 3-15.
- [34] Meil G, Formayer H, Klebinder K, et al. Climate change effects on hydrological system conditions influencing generation of storm runoff in small Alpine catchments[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(6): 1314-1330.
- [35] Lobanova A, Liersch S, Tabara J D, et al. Harmonizing human-hydrological system under climate change: A scenario-based approach for the case of the headwaters of the Tagus River[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 436-447.
- [36] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis[M]. Cambridge University Press: Cambridge, 2001.
- [37] Kodama T, Nitta A, Genda H, et al. Dependence of the onset of the runaway greenhouse effect on the latitudinal surface water distribution of earth-like planets[J]. Journal of Geophysical Research. Planets, 2018, 123(2): 559-574.
- [38] Dashtseren A, Ishikawa M, Iijima Y, et al. Temperature regimes of the active layer and seasonally frozen ground under a forest-Steppe Mosaic, Mongolia[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2014, 25(4): 295-306.
- [39] Evans S G, Ge S. Contrasting hydrogeologic responses to warming in permafrost and seasonally frozen ground hillslopes[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(4): 1803-1813.
- [40] Qin Y, Chen J S, Yang D W, et al. Estimating seasonally frozen ground depth from historical climate data and site measurements using a Bayesian Model[J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4361-4375.
- [41] Hu T G, Liu J H, Zheng G, et al. Evaluation of historical and future wetland degradation using remote sensing imagery and land use modeling[J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(1): 65-80.
- [42] Riley W D, Potter E C E, Jeremy B, et al. Small water bodies in Great Britain and Ireland: Ecosystem function, human-generated degradation, and options for restorative action[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 1598-1616.
- [43] Miyasaka T, Okuro T, Zhao H, et al. Impacts of the local land-use system in a semi-arid region of northeastern China on soil properties, crop growth, and weed communities[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(11): 1155-1163.
- [44] Erwin K L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world[J]. Wetlands Ecology and Management, 2009, 17(1): 71-84.

Evolution process and driving force analysis of natural wetlands in Xiliao River Basin based on SWAT model

Yu Chenglong^{1,2}, Wang Zhichun³, Liu Dan^{1,2*}, Zhao Huiying^{1,2}, Gong Lijuan^{1,2}, Tian Baoxing^{1,2}

(1. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China; 2. Northeast China Ecological and Meteorological Open Innovation Laboratory, China Meteorological Administration, Harbin 150030, China; 3. Chifeng Meteorological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Chifeng 024000, China)

Abstract: Natural wetland is one of the most productive ecosystems, providing with the wide arrays of ecological services to the local communities in particular and global communities in general. The Xiliao River Basin in the eastern edge of agro-pastoral ecotone in northern China, has become an important agricultural and animal husbandry production base, with obviously regional transition and vulnerability of ecosystem. It is necessary to accurately assess the driving forces of wetland ecosystem evolution, thereby to understand the long-term evolution of wetland ecosystem, and the contribution rate of climate and human factors to wetland change. In this study, taking the Xiliao River Basin as a research area, a quantitative analysis was made to investigate the evolution and hydrologic attribution of wetlands using the soil and water assessment tool (SWAT Model), Geo-detector, landscape conversion methods. The digital elevation model (DEM), land use, meteorological observation, and vegetation index data were firstly utilized to define the geographical region in the Xiliao River Basin, and then to explore the lake and marsh wetland areas, landscape conversion characteristics, change characteristics of marsh wetland vegetation, and river runoff depth, finally to quantify the types of natural wetland for a long time series and the transformation process. An emphasis was placed on the impact factors of climate or land use on wetland change and their interaction, as well as the contribution rate of driving factors to wetland change. The results showed that the average areas of lake and swamp were 607.14 km², and 2 657.00 km², respectively, both of which showed a decreasing trend. The average depth of river runoff was 48.46 ± 36.82 mm, indicating no obvious change trend. Most types of land use had invaded the swamps and lakes, with the largest area occupied by cultivated lands. Since 1980, there was a dry-wet-dry transformation process occurred in the Xiliao River Basin, except for the wet periods in 1995-2000. From 2000-2015, the mean NDVI and the average annual GPP were 0.30 and 257.73 g/(m²·a) in the growing season of swamp wetlands, both of which showed an extremely significant upward trends and regional differences. There was a highly significant linear positive correlation between the changes of lake area, the runoff depth, precipitation and evapotranspiration, a highly significant conic relationship between the change of swamp area and the above two factors, and a highly significant linear positive correlation between NDVI, GPP, and accumulated temperature in the growing season. The influence of natural factors on wetland changes was greater than that of human factors. The precipitation was the main control factor of wetland changes in the Xiliao River Basin. A single factor driving effect showed that the precipitation was the main controlling factor of wetland change in Xiliao River Basin, where the order of driving capacity of precipitation and evapotranspiration on wetland change from large to small was the marsh area, river runoff, and lake area. A synergistic effect of precipitation and evapotranspiration on lake, swamp, and runoff depth was higher than 70%. This finding can offer the possible mechanisms to control the changes of wetland ecosystem in the Xiliao River Basin.

Keywords: land use; models; NDVI; wetland; climate change; SWAT; Xiliao River