

应用集萃法分析海河流域滨海湿地退化成因

杨昊臻, 杨小柳

(北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘要:近年来,海河流域滨海湿地退化现象严重,为科学合理地对其实施恢复和保护,须探究湿地退化的影响因素,辨识主要退化成因。广泛收集关于海河流域滨海湿地退化评价的实证研究案例,采用集萃法中的 Meta-regression 模型,对湿地退化因素及其影响程度进行了综合性的对比与分析。结合 57 个研究案例,提取 525 个观察值,筛选出自然和人为两类共 9 种退化影响因素,通过模型拟合得到各因素对湿地退化的影响程度。模型结果显示:海河流域滨海湿地的退化受到人为与自然因素的双重影响。人为因素中,水资源开采(1.512)、水质污染(0.813)、水产养殖(0.593)、围垦与建设占用(0.436)对湿地退化均为正效应,政策法规(-1.202)呈负效应;自然因素中,降水量(-0.788)与河流径流量(-1.176)对湿地退化呈显著负效应,气温(0.037)与生物多样性损失(0.072)呈较弱的正效应。海河流域滨海湿地的退化影响因素按照影响程度大小排序为:水资源开采>政策法规>河流径流量>水质污染>降水量>水产养殖>围垦与建设占用>生物多样性损失>气温,湿地退化的核心成因在于湿地水资源的补给与存蓄受到了威胁。据此建议,海河流域滨海湿地的恢复与保护应优先解决水源问题,同时应加强相关政策、规划和法律的制定与执行。

关键词:集萃法; Meta-regression 模型; 海河流域; 滨海湿地; 退化成因

中图分类号:X171.1; P941.78

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0345-08

Identifying the Degradation Causes of the Coastal Wetlands in Haihe River Basin Based on Meta-Analysis

YANG Haozhen, YANG Xiaoliu

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In recent years, the coastal wetlands in Haihe River Basin have seriously degraded. In order to restore and protect the wetlands scientifically and reasonably, it is necessary to explore the influencing factors of degradation and identify the main degradation causes. In this study, relevant research cases on the evaluation of coastal wetland degradation in Haihe River Basin were collected extensively, and the meta-regression model was applied to identify the degradation factors and analyze the importance of each factor. 57 research cases were comprehensively analyzed, 525 observations were extracted, and 9 factors of two human and natural types were identified, and the importance of each factor was estimated through model fitting. The modeling results show that the degradation of coastal wetlands in Haihe River Basin is affected by both human and natural factors. Among the human factors, 'Water Resources Extraction' (1.512), 'Water Pollution' (0.813), 'Aquaculture' (0.593), 'Reclamation and Construction' (0.436) have positive effects on the degradation, while 'Policies and Regulations' (-1.202) have negative effects, which means it is beneficial to restoration and protection of the wetlands. Among the natural factors, 'Precipitation' (-0.788) and 'River runoff' (-1.176) have significantly negative effects, while 'Air Temperature' (0.037) and 'Biodiversity Loss' (0.072) have relatively weak positive effects. The analysis shows that the degradation factors can be ranked as follow according to their importance: Water Resources Extraction>Policies and Regulations>River Runoff>Water Pollution>Precipitation>Aquaculture>Reclamation and Construction>Biodiversity Loss >Air Temperature. The core cause of wetland degradation is that the supply and storage of wetland water resources have been under threat. It is implied that the primary task to protect and restore the coastal wetlands in Haihe River Basin is to tackle the

收稿日期:2020-03-23

修回日期:2020-04-28

资助项目:环保部水体污染和治理重大专项“海河南系子牙河流域下游湿地生态恢复关键技术与示范”(2014ZX07203008)

第一作者:杨昊臻(1995—),男,河南省平顶山市人,硕士研究生,研究方向为湿地退化。E-mail:alexxyangpku@yeah.net

通信作者:杨小柳(1958—),男,北京人,博士,教授,博士生导师,研究方向为流域综合管理。E-mail:xlyang11@pku.edu.cn

issues on water resources development and, at the same time, to strengthen the formulation and enforcement of the policies and regulations relevant to wetland protection and restoration.

Keywords: meta-analysis; meta-regression model; Haihe River Basin; coastal wetland; degradation causes

滨海湿地是海洋生态系统与陆地生态系统相互交汇的复合地带,是生态系统与生物资源多样化的区域,同时也是生态环境较为敏感与脆弱的地带^[1]。近年来,海河流域滨海湿地退化现象十分严重,出现了水面萎缩、自然湿地面积转化、环境功能退化、生物多样性下降等诸多问题^[2];因此,为了对退化湿地进行科学的生态恢复与保护,需要首先探究影响湿地退化的具体因素,辨识其主要成因^[3]。目前,许多研究采用不同方法对海河流域相关滨海湿地的退化成因进行了分析,部分研究使用定性研究方法,通过对影响因素的罗列和描述对湿地退化的成因进行分析^[4-6],没有进一步研究这些因素对退化的影响程度;部分研究在定性分析的基础上,选取相关指标,构建退化成因体系,采用定量分析的方法进一步分析了影响因素对于退化结果的具体程度。目前已有的研究结果显示,导致海河流域滨海湿地退化的主要成因包括自然因素和人为因素两类,其中人为因素起到主要作用。然而,相关研究在构建湿地退化成因指标体系时仍面临着一些困难:一方面,研究需要在较大的时间跨度上收集多个退化成因指标的原始数据,但部分指标的数据在年鉴、统计网站等一手数据源中存在着缺失、统计概念与口径前后不一致等问题,还有部分指标需要进行实地调查收集,成本较高,且难以跨时间获取^[7],这些导致研究者在选择指标时,不得不选取一些数据容易获取、但与湿地退化缺乏明确因果关系的指标,如人均 GDP、农业人口比例、固定资产投资等;另一方面,湿地退化是一个复杂而动态的系统性过程,涉及的影响因素多种多样,且因素的相互关系复杂,在这种情况下,如果指标体系中的因素与湿地退化缺乏因果关联,就难以准确展示湿地退化影响因素间的主次关系,也无法真正厘清导致湿地退化的主要成因。针对这一问题,本研究尝试以湿地退化评价研究作为数据源,结合近二十年的文献资料与数据结果,采用集萃法对海河流域滨海湿地的退化成因进行分析,尝试为湿地退化成因分析寻找新的思路与方法。

集萃法(Meta-analysis)是一种对拥有共同研究目的的多个独立研究结果进行定量、合并分析,并综合评价研究结果的统计方法^[8]。集萃法起源于统计学中“合并 p 值”的原理,1976 年 Gene Glass^[9] 在研究中将相关思想与方法进一步整合,将其定义为 Meta-analysis。此后,集萃法被引入包括循证医学、教

育、心理学、市场营销等众多行业^[10]。在 20 世纪 90 年代,集萃法被生态学界发现并引起了高度重视^[11],随即被广泛应用于地下水、大气污染、濒危物种、湿地等多个领域^[12]。在发展过程中,集萃法逐渐细化出网状集萃法、PMA 法(Prospective Meta-analysis)、Meta-regression 模型等诸多方法^[13]。其中,Meta-regression 模型是集萃法分析中较为常用的模型方法,它可以对同一研究课题下多个研究结果的同质性与异质性进行分析与评价,尝试找出不同研究结果的统计关系^[14]。

Meta-regression 模型的一般形式通常为:

$$y_{(ij)} = \beta_0 + \beta_A X_{Aij} + \beta_B X_{Bij} + \beta_C X_{Cij} + \mu \quad (1)$$

式中: y 是待研究的效应值; j 表示第 j 个样本; i 表示样本中第 i 个观察值; $\beta_A, \beta_B, \beta_C$ 分别为研究特征 X_A (研究对象特征)、 X_B (研究方法特征)、 X_C (研究背景特征)的系数向量; β_0 为常数项; μ 为残差项^[15]。在 Meta-regression 模型中,以效应值为结果变量(因变量),以影响效应值大小的研究特征为解释变量(自变量),则模型拟合后的系数向量描述了结果变量是如何随着解释变量的单位增减而改变的,表征了相关研究特征对研究效应值的影响方式与影响程度^[13]。

当前,Meta-regression 模型在湿地研究领域已经得到了广泛的应用,主要集中在湿地生态价值评估与转移等方面,国内外学者应用以 Meta-regression 模型为基础的效益转移法,将已有的湿地生态系统服务价值评估结果转移到待研究湿地,实现对该湿地价值的评估^[16-21]。在湿地退化研究和成因分析方面,Sanneke van Asselen 等^[22]在 2013 年的研究中使用 Meta-regression 模型对全球范围内湿地演变的驱动力进行综合分析,认为湿地演变是多种驱动力共同作用的结果,其中农业发展是导致湿地转化最主要的直接原因,经济增长和人口密度是最常见的潜在因素;在国内则尚未看到集萃法与 Meta-regression 模型在湿地退化相关问题中的相关研究。综上所述,本研究应用集萃法,收集关于海河流域滨海湿地退化评价的实证研究结果,建立数据库,构建关于湿地退化成因的 Meta-regression 模型,尝试对海河流域滨海湿地的退化成因及影响程度进行综合对比与分析。

1 研究地区概况

海河流域东临渤海,南界黄河,西倚太行,北接蒙

古高原,流域总面积达 31.82 万 km^2 ,包括海河、滦河和徒骇马颊河三大水系^[23]。作为华北平原最大的水系,海河流域以不足全国 1.3% 的水资源承担着全国 10% 的人口、13% 的 GDP 用水,具有非常重大的社会经济战略地位^[24]。海河流域下游滨海湿地资源非常丰富,典型滨海湿地包括七里海湿地、北大港湿地、南大港湿地。各个湿地的具体分布情况见图 1。



图 1 海河流域滨海湿地分布

2 研究方法与研究过程

2.1 研究方法概述

根据集萃法的一般原理,本研究的具体步骤主要分为以下 3 步:

(1) 建立数据库。在一定条件下对研究案例进行筛选,并将筛选出的研究案例相关信息予以整合,建立集萃法研究的数据库。研究案例可以来源于已发表的文献、会议论文等,也可以来源于未发表的相关研究与原始数据等^[25]。

在本研究中,所筛选的研究案例均来源于海河流域滨海湿地退化评价的实证研究。这些研究通过结合多个因素指标,采取如 PSR 模型^[26-28]、层次分析法^[29-30]、综合矩阵分析法^[31-32]、快速评估法等^[33-34]模型方法对湿地退化程度进行了定量的评价;研究中所构建的评价指标体系相对完整,指标选择较为全面、细致,涉及了人类活动、水文条件、污染程度、气候特征等多种与湿地退化具有直接相关性的因素指标。

(2) 选择自变量与因变量,构建 Meta-regression 模型。根据 Meta-regression 模型的一般形式,结合本研究具体情况,构建模型为:

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_s X_{sij} + \beta_p X_{pij} + \beta_e X_{eij} + \beta_t T_{ij} + \mu \quad (2)$$

式中:因变量 y 是湿地退化的评价结果向量; i 和 j 代表第 j 个研究中的第 i 个观察值,则 y_{ij} 代表第 j 个研究中的第 i 个湿地退化的评价结果,该变量结果越大,说明湿地整体的退化评价结果越不乐观,退化程度越严重; β_0 为常数项; μ 为残差项; $\beta_s, \beta_p, \beta_e, \beta_t$ 为自

变量的回归系数矩阵; X_s, X_p 和 X_e 为自变量矩阵,其中; X_s 是代表湿地本身属性的自变量矩阵,在本研究中主要指湿地所处的地点; X_p 是代表湿地评估方法的自变量矩阵,表示数据库中的相关研究案例所采用的评估方法; X_e 是代表湿地退化评价的各种参考量的自变量矩阵,主要包括湿地相关的自然与人为因素;同时,本研究根据研究年限引入 T_{ij} 作为相应的时间序列变量矩阵。

(3) 运用相关软件对构建好的 Meta-regression 模型进行拟合,计算各个自变量的回归系数矩阵。在本研究中,使用最小二乘法 (Weighted Least Squares, WLS) 来计算回归系数项 $\beta_s, \beta_p, \beta_e, \beta_t$, 并把方差的倒数作为权重,以最小二乘平方求算 $\beta_0, \beta_s, \beta_p, \beta_e, \beta_t$, 使误差平方和为最小。以单个系数 β_s 的一元回归为例,最小二乘法就是使以 β_s 为自变量系数,以 β_0 为常数项的回归线能够更接近 y 的真实值。残差项用 μ 表示,则残差表达式为:

$$\sum \mu^2 = \sum (y - \bar{y})^2 = \text{SSE} \quad (3)$$

式中: μ 为残差项; y 为因变量的真实值; \bar{y} 为以 β_s 为系数、以 β_0 为常数项的回归线拟合值;SSE 为残差平方和。利用式(3)计算 β_0 和 β_s :

$$\text{SSE} = \sum (y - \bar{y})^2 = \sum (y - \beta_0 - \beta_s x)^2 \quad (4)$$

式中: β_0 为常数项; β_s 为自变量系数; x 为自变量。要求解使 SSE 最小的 β_s 与 β_0 , 需要分别对两者进行微分,并令其结果为 0:

$$\frac{\partial \text{SSE}}{\partial \beta_0} = 0 \quad \& \quad \frac{\partial \text{SSE}}{\partial \beta_s} = 0 \quad (5)$$

继续求解式(5)可得:

$$\sum y = n\beta_0 + \beta_s \sum x \quad \& \quad \sum xy = \beta_0 \sum x + \beta_s \sum x^2 \quad (6)$$

式中: n 为样本数。求解式(6)中的两个等式,可以得到 β_s 与 β_0 的表达式如下:

$$\beta_s = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \& \quad \beta_0 = \bar{y} - \beta_s \bar{x} \quad (7)$$

其他参数的计算方法以此类推。计算结束后,即可得到拟合完成的 Meta-regression 模型。

2.2 研究数据的收集和数据库的建立

本研究通过关键词、主题词等方式,在中国学术期刊网络出版总库中遍历检索了所有与海河流域滨海湿地退化评价有关的实证研究文献,并在根据相关标准筛选出了所有符合标准的文献后,进一步提取研究案例。研究中,筛选文献资料与研究案例时有以下标准:

(1) 研究案例为针对海河流域滨海湿地退化的定量化评价研究;

(2) 评价对象包含七里海、北大港、南大港湿地的案例;

(3) 评价方法以加权平均求和为原理的案例。

此外,部分研究案例来源于《海河南系子牙河流域下游湿地生态恢复关键技术与示范》项目中海河水利委员会完成并汇总的研究结果数据,筛选标准同上。

最终,共 57 例相关研究案例被筛选,提取出 525 个观察值进入数据库。筛选得到的研究案例时间范围在 2000—2019 年,案例的研究目标为海河流域滨海湿地,主要包括七里海、北大港、南大港 3 块典型滨海湿地。将入选数据库的案例信息录入 Excel 表中建立数据库,主要包括研究年份、湿地名称、影响湿地退化的因素指标、湿地退化的评价结果以及使用的评价方法等多类信息。

2.3 Meta-regression 模型的自变量选取

参考国外相关研究中对自变量的选取^[22],结合数据库中研究案例的变量结构和数据的实际情况,本研究选择湿地退化影响因素、退化评价方法、湿地地点与研究时间作为 Meta-regression 模型的自变量:

(1) 湿地退化影响因素。由于各个实证研究案例在选取因素指标时存在主观差异,其中部分湿地退化影响因素是极少数、甚至单一案例中所特有的,因而这些因素作为变量在数据库中也包含了极大比例的缺失数据。这类变量表征了特定样本的特殊性质,但在综合分析中缺乏比较意义,还可能会影响分析结果的质量与准确性^[35-37]。因此,本研究根据数据库中各因素变量的实际数量分布,对退化影响因素变量进行筛选,得到自然和人为两类共 9 种退化影响因素。其中,自然因素包括气温、降水量、河流径流量、生物多样性损失;人为因素包括水质污染、围垦与建设占用、水资源开采、水产养殖、政策法规。这些因素相较于人均 GDP、农业人口比例等指标,与湿地退化具有更为直接的因果关系,也是诸多研究案例的“共同选择”。

(2) 湿地退化评价方法。研究案例中的湿地退化评价方法包括压力—状态—响应(PSR)模型、层次分析法(AHP)、综合矩阵分析法、快速评价法。这些方法的基本原理是以“因子—权重”的对应形式建立湿地退化评价指标体系,采用加权平均求和的原理计算湿地退化的综合评价结果。而各方法的层次结构与权重判别方式可能存在差别,也会导致不同评估方法的使用对湿地退化评价结果产生影响。需要说明的是,层次分析法(AHP)是较为常见的权重判别方法,在本研究中,如果一个研究案例在已声明使用某种方法的情况下,又采用 AHP 法进行权重确定,则认为该案例使用的是其声明的研究方法。

(3) 湿地地点与研究时间。本研究将各个案例中的研究地点与研究时间作为变量纳入 Meta-regression

模型,尝试利用集萃法将不同研究案例的研究结果在研究地和研究时间方面进行合并分析并建立比较关系。

2.4 数据预处理

(1) 数据的标准化。在研究案例中,由于不同方法往往使用不同的层次结构与权重,甚至同一种方法在不同研究中的打分方式也可能不一致,导致不同研究中湿地的退化评价结果在分布范围和表征意义上会有较大的差异。基于本研究中涉及的湿地退化评价方法都采用了“加权平均求和”的原理,研究中对数据进行标准化处理如下:通过放缩在不改变数据点的几何距离与分布的情况下将不同研究中的数据调整至同一范围;通过取倒数将各个实证研究案例中的影响因素指标评价结果数据指标统一标准化为“数值越大湿地退化评价越不乐观”的表征关系。

(2) “哑变量”赋值。按照统计和计量的数据要求,将自变量中除时间外的各类信息视为“哑变量”(虚拟变量)进行“编码”和赋值。Meta-regression 模型的变量信息见表 1。

(3) 将因变量转化成对数数据的形式。根据现有国内外与集萃法分析相关的研究,这样的变换通常能够减少原始数据的波动程度和非对称性,从而减小异方差^[38]。

3 结果与分析

3.1 Meta-regression 模型的回归结果

本研究中使用 Python 3.7 软件,应用最小二乘法对上表中的变量进行 Meta-regression 模型拟合,得到模型各项因子的拟合结果见表 2。

保留在模型中的自变量有 16 个,Meta-regression 模型的 R^2 为 0.967。在拟合得到的模型中没有包括压力—状态—响应(PSR)模型这一变量,原因在于该变量大于显著性水平($p > 0.1$),对因变量不具有显著的解释能力。

3.2 模型结果与分析

根据表 2 的 Meta-regression 模型拟合结果,在湿地退化影响因素矩阵中,各影响因素变量系数的正负性表征了该变量对湿地退化评价结果呈正效应或负效应,系数绝对值的大小表征了变量的影响程度。其中,大部分人为因素与湿地退化评价结果呈正相关,其中水资源开采(1.512)、水质污染(0.813)的正相关性更显著,水产养殖(0.593)、围垦与建设占用(0.436)次之,说明上述人类活动行为是导致湿地退化的主要原因;政策法规(-1.202)是人为因素中唯一与模型结果呈显著负相关的因素,这是由于相关法规政策的制订与执行,能够对湿地区域的生产、生活

行为产生针对性的引导与强制性的限制^[39],对湿地退化具有明显的抑制作用。自然因素中,河流径流量(−1.176)、降水量(−0.788)两个变量会直接影响到湿地水资源量,降水越丰沛,湿地周边的河流径流量越高,湿地水资源量越充足,因而在模型中呈显著负

相关;气温(0.037)的升高会带动蒸发、蒸散作用,影响到湿地水资源的存蓄;而生物多样性损失(0.072)的增加意味着湿地区域的植被覆盖率、动植物数量与种类、底栖生物丰富度的下降,以及湿地生态环境遭到破坏,会导致湿地功能的退化。

表 1 Meta-regression 模型的变量信息

变量	赋值	变量性质	均值	标准差	观察值数量
因变量:					
湿地退化的评价结果(Y)	—	数值型变量(自然对数形式)	3.831	0.276	57
湿地退化影响因素:					
围垦与建设占用(X ₁)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.772	0.420	44
水质污染(X ₂)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.860	0.347	49
水产养殖(X ₃)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.614	0.487	35
水资源开采(X ₄)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.561	0.496	32
政策法规(X ₅)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.228	0.420	13
生物多样性损失(X ₆)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.316	0.465	18
气温(X ₇)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.860	0.347	49
降水量(X ₈)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.719	0.449	41
河流径流量(X ₉)	1/0	如果有此项评价影响因素取值为 1,否则为 0	0.175	0.380	10
湿地退化评价方法:					
压力—状态—响应模型(X ₁₀)	1/0	如果使用的评价方法为此方法取值为 1,否则为 0	0.386	0.487	22
层次分析法(X ₁₁)	1/0	如果使用的评价方法为此方法取值为 1,否则为 0	0.211	0.408	12
综合矩阵分析法(X ₁₂)	1/0	如果使用的评价方法为此方法取值为 1,否则为 0	0.158	0.365	9
快速评估法(X ₁₃)	1/0	如果使用的评价方法为此方法取值为 1,否则为 0	0.246	0.430	14
湿地地点与研究时间:					
七里海(X ₁₄)	1/0	如果被评估湿地是七里海湿地取值为 1,否则为 0	0.333	0.471	19
北大港(X ₁₅)	1/0	如果被评估湿地是北大港湿地取值为 1,否则为 0	0.298	0.457	17
南大港(X ₁₆)	1/0	如果被评估湿地是南大港湿地取值为 1,否则为 0	0.368	0.482	21
研究时间(X ₁₇)	—	数值型变量(以 1999 年为 0 点,依次累加)	10.526	4.061	57

表 2 集萃法分析中各项因子的拟合结果

变量	标准化系数
围垦与建设占用(X ₁)	0.436
水质污染(X ₂)	0.813 *
水产养殖(X ₃)	0.593 * *
水资源开采(X ₄)	1.512
政策法规(X ₅)	−1.202 *
生物多样性损失(X ₆)	0.072
气温(X ₇)	0.037 *
降水量(X ₈)	−0.788 *
河流径流量(X ₉)	−1.176 * *
层次分析法(X ₁₁)	1.079 *
综合矩阵分析法(X ₁₂)	−0.042
快速评估法(X ₁₃)	−0.237
七里海(X ₁₄)	−1.050 *
北大港(X ₁₅)	−0.528 *
南大港(X ₁₆)	−0.356
研究时间(X ₁₇)	0.303 *

注:样本数 N=57,R²=0.967,F=74.141 * * ; * * 在 0.01 水平上显著; * 在 0.05 水平上显著。

在湿地退化评价方法矩阵中,模型合并比较了不

同评价方法在研究中的表现。层次分析法(1.079)、综合矩阵分析法(−0.042)、快速评估法(−0.237)的回归参数在统计上显著,说明在其他条件相似的情况下,3 种方法得到的湿地退化评价结果会存在方法性上的差异。使用综合矩阵分析法和快速评估法得到的湿地退化评价结果相对其他方法偏低,表征意义相对更乐观;使用层次分析法得到的评价结果最高,表征意义相对更严重。

在湿地地点矩阵中,模型综合比较了 3 块湿地退化评价结果的整体差异。当被评价的湿地分别为七里海、北大港与南大港时,模型拟合结果在统计上表现为七里海(−1.050)<北大港(−0.528)<南大港(−0.356),这表示在其他条件相似的情况下,3 块滨海湿地在退化评价中整体表现为南大港湿地退化情况相对严重,北大港次之,七里海湿地的退化情况相对最轻。同时,模型在研究时间矩阵中对湿地的整体退化情况进行了时序拟合,研究时间(0.392)在模型的拟合结果中表现为正相关,这意味着湿地的整体退化评价结果在时序上表现为逐渐提升的状态。

3.3 海河流域滨海湿地退化成因分析

结合上述对模型结果的分析可以看到,海河流域滨海湿地的退化是在人为因素和自然因素的共同作用下进行的。

在人为因素中,水资源开采和水质污染是导致湿地退化的主要成因。海河流域滨海湿地所在的区域淡水资源非常短缺,为了满足工农业生产与生活用水的需求,需要大量开采地下水,因此,湿地区域及周边河流遍布采水井,地下水超采率达40%上下。长期高强度地超采地下水改变了湿地的水文条件,导致地下水位下降,湿地水源补给受阻严重,最终使得湿地逐渐干涸,功能和生态环境逐渐退化^[40]。而随着周边地区工业的发展与人口密度的提升,工业废水和生活污水的排放量也逐年增加,致使湿地水质受到了严重污染。根据海河水利委员会在2019年的项目调查报告,在七里海、北大港、南大港3块湿地共14个采样点中,依据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)进行评价,有13个采样点的水质类别为劣V类,1个采样点的水质类别为V类,湿地水体整体上受污染十分严重,很容易引起湿地生物死亡,导致湿地的原有生物群落结构遭到破坏,并通过食物链富集影响到其他物种,严重干扰湿地生态平衡^[41]。

同时,水产养殖、围垦与建设占用也是导致湿地退化的重要成因。近年来水产养殖业发展迅速,导致海河流域滨海湿地的自然湿地逐渐向库塘湿地、盐田湿地等人工湿地进行转化,也造成了滨海湿地严重的富营养化问题,湿地原有的水环境与生态功能逐渐丧失^[42]。而在滨海湿地周边的围垦极易影响湿地区域与海水的连通性,湿地性质由此发生变化,失去特有的生态功能与价值^[43],如七里海湿地周边沿岸约60%土地已被开垦为耕地,其环境的整体性已遭到人为的破坏。此外,相关的建设开发活动不仅会和围垦一样造成自然湿地面积被侵占,部分建设活动,如北大港和南大港的油田开发,还会对湿地区域的水文条件造成破坏,进而导致湿地水资源退化;一些针对湿地及周边河流的水利工程建设也会直接导致大量水资源被拦截或改道,进而使得湿地水资源减少,如潮白新河的开挖及挡潮闸的修建,导致原本属于七里海湿地的上游来水直接泄入大海,造成了七里海水量补充减少,同时也阻断了鱼虾蟹类的回游途径。

在自然因素中,降水量与河流径流量对湿地退化过程有着重要的影响,主要是由于降水量及河流径流量是湿地水源补给的重要方式^[44],降水量的丰沛与否以及河流径流量的大小直接影响到湿地的水资源量。而由于气候的相对干旱,近年来海河流域滨海湿

地区的天然降水逐渐减少,根据海河水利委员会在2019年的项目调查报告,七里海湿地所在的宁河区在80年代年平均降雨量约685 mm,90年代年平均降雨量约593 mm,而2015年前后的年平均降雨量不足400 mm;北大港湿地所在的大港区多年平均降雨量为560 mm,而近几年每年的降雨量只有500 mm左右;南大港湿地所在的沧州地区的年降水量也呈现明显的下降趋势,1994—2003年的年平均降水量比1964—1973年减少约150 mm,2015年前后的年降水量减为约390 mm。同时,湿地区域内的河流也存在径流量减少乃至断流的情况,如独流减河、子牙新河在九十年代的平均入海量尚有5.6亿m³,自2000年后有近6 a时间呈现几乎断流的状态;过境水量的减少,也制约了区域内的滨海湿地水资源的存蓄。

此外,政策法规作为一项特殊的人为因素,在湿地退化过程中也有着重要作用。由于相关政策法规具有引导性与强制性,对于制约影响湿地环境的生产活动与生活行为往往具有立竿见影的即时性效果;同时,与湿地保护相关的法律与政策会起到宣传的作用,人们保护湿地的意识也会随之提高,有利于抑制湿地的退化趋势^[45]。目前,七里海、北大港、南大港3块湿地都已成立了湿地自然保护区,并先后推出了相关的湿地生态保护修复规划、生态保护“十大工程”等政策,相关法律法规体系也在逐渐完善,这对于海河流域滨海湿地的恢复与保护具有重要的意义。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究综合上述分析认为,人为因素与自然因素对于海河流域滨海湿地的退化都具有重要的影响,其中核心成因在于湿地水资源的补给与存蓄受到了威胁。因此,模型中对湿地水资源影响更直接的因素,在湿地退化过程中也呈现出更大的影响程度与主导作用。结合模型拟合结果,各因素对湿地退化影响程度从大到小的顺序为:水资源开采(1.512)>政策法规(-1.202)>河流径流量(-1.176)>水质污染(0.813)>降水量(-0.788)>水产养殖(0.593)>围垦与建设占用(0.436)>生物多样性损失(0.072)>气温(0.037)。其中,水资源开采、水质污染直接造成了湿地水资源量减少、水体萎缩与水生态环境恶化等问题,降水量、河流径流量作为重要的水资源补给来源也会直接影响到湿地水量的丰沛与否,所以这些因素是影响海河流域滨海湿地退化的主要成因。水产养殖、围垦与建设占用等行为活动在侵占自然湿地面积的同时,还对湿地的水文条件造成了重大的影响乃

至不可逆的破坏,进而也会影响到湿地水资源的存蓄,是湿地退化的重要成因。此外,政策法规作为一项性质特殊的人为因素,对湿地内生产活动与生活行为具有约束、引导功能,对湿地退化具有强效、即时的制约与抑制作用。因此,针对湿地水资源的补给与存蓄问题,可以通过制定对应的政策与法规来遏制它们对湿地的影响;政府与相关部门可以通过继续规划实施调水、补水工程,如已取得一系列成果的“引黄济津”工程、南水北调工程和针对湿地的生态调水措施^[46],一方面可以为湿地提供稳定的水源补给保障,解决湿地的水资源补给问题,另一方面调水也可以满足对工业与生活用水的供给,缓解水资源的过度开采问题;同时,可以通过加强湿地及周边河流的排污检测、有计划地升级改造污水处理厂、推广健康的水产养殖技术体系、引导化肥农药的合理使用等多种措施的结合,减少污水的排放量,增加污水的收集率和治理率,改善湿地的水质污染问题。此外,针对围垦、养殖与工业开发等问题,可以通过不断完善相关湿地的生态保护与修复规划,推进相关法律法规建设,对湿地区域内的生产生活行为进行统一管理,以规避不合理的工农业开发与城市建设活动对湿地环境的破坏,坚持“以保护求持续发展,以发展促环境保护”的湿地发展战略^[4]。

针对海河流域滨海湿地的退化成因分析,已有多位学者采用不同方法进行了定量研究^[47],在构建关于湿地退化成因的指标体系的基础上,进一步量化分析了各个因素指标对于退化结果的影响程度并进行比较,从而得到湿地退化的主要成因。然而,受限于部分指标数据的缺失情况与获取难度,许多研究在构建指标体系时可选取的合适的指标数量较少,部分研究不得不在指标体系中加入与湿地退化相关性不强、但数据容易获取的因素指标,而这在湿地退化成因较多、机制复杂的背景下,其分析结果难以准确表现湿地退化的具体成因及主次关系。通过本文的研究,以相关湿地退化评价研究案例作为数据源,应用集萃法汇总了多年的文献与资料,提取案例中的数据指标和结果进行合并分析,避免了构建指标体系时数据源缺失与获取成本过高的问题,为湿地退化成因分析研究提供了新的思路与尝试。同时,本文在研究过程中发现,虽然针对海河流域滨海湿地退化评价研究已有许多研究案例,但目前尚未出现一个统一的评价指标体系和评价方法。不同的研究案例在评价过程中采用的因素指标往往不完全一致,方法论中的权重定义与评价体系层次结构也会存在一定差异。这导致不同退化评价研究的结果在空间和时间上形成了相对孤立,很少进行直接对比与综合分析。本研究基于众多

湿地退化评价实证研究结果的合并,尝试利用集萃法分析各研究的共性与差异性,得到了各个因素指标的定量化对比关系,不失为一种对湿地退化评价研究进行综合分析的可行思路与方向。

作为一种间接的评价方法,集萃法的可靠性在很大程度上取决于已有研究的数量和质量。在本研究中,一方面,出于对数据进行放缩的标准化处理需要,仅筛选了退化评价方法的基本原理等价于“加权平均求和”的研究案例,导致部分研究案例由于评价方法在原理上的不等价而无法纳入模型,限制了模型的样本数;另一方面,由于不同案例中因素指标选取不统一,部分因素由于观察值数目过少无法纳入模型,制约了模型的变量数;以上不足都会对集萃法的综合能力与结果质量造成一定的影响。而可以展望的是,随着湿地退化评价相关研究的积累和发展,在不断的试错与比较过程中,会逐渐形成相对成熟、统一的评价指标体系与评价方法,应用集萃法时可以建立更加丰富、完备的数据库,提升模型的综合性与精确性,在未来相关研究中具有不小的应用空间。

4.2 结论

(1) 整体来看,海河流域滨海湿地的退化受到人为与自然因素的双重影响。根据分析结果,各因素按照影响程度大小排序为:水资源开采>政策法规>河流径流量>水质污染>降水量>水产养殖>围垦与建设占用>生物多样性损失>气温。人为因素中的水资源开采、水质污染,与自然因素中的降水量、河流径流量等因素属于导致湿地退化的主要成因;围垦与建设占用、水产养殖是导致湿地退化的重要成因。此外,政策法规作为性质特殊的人为因素,对湿地退化具有强效、即时的抑制效果,可以通过制定具有针对性的政策与法律,遏制相关因素对湿地退化的影响。

(2) 结合 Meta-regression 模型中的变量对比与机制分析,可以发现海河流域滨海湿地退化的核心成因在于湿地水资源的补给与存蓄受到了威胁。在湿地退化的动态过程中,能够影响湿地水资源的因素会对湿地退化产生重要影响,因素对水资源补给与存蓄的影响越直接,该因素对退化的主导作用就越强。因此,在针对海河流域滨海湿地的恢复策略中,应优先解决水源问题,通过规划调水、补水工程和污染治理方案等措施,改善湿地水资源的补给来源与存蓄环境。

(3) 本研究利用集萃法针对海河流域滨海湿地退化成因进行了定量分析,需要注意的是,本方法得到的统计学上的定量结果表征的是相对意义而不是绝对意义,对于一个影响因素而言,在分析结果上的相对“较小”并不意味着该因素“不重要”,因为这些因

素在湿地退化的过程中是相互影响、共同作用的,同时部分因素也存在着一定的因果关系。因此,在进行湿地恢复与保护的过程中,厘清主要成因、解决首要问题的同时也需要进行多方面措施的综合协调,而不是采取相对单一的保护措施。

参考文献:

- [1] 侯思琰,徐宁,徐鹤.海河流域典型滨海湿地生境问题诊断[J].海河水利,2019(4):13-17.
- [2] 肖庆聪,魏源送,王亚伟,等.天津滨海新区湿地退化驱动因素分析[J].环境科学学报,2012,32(2):480-488.
- [3] 孟伟庆,王中良,汲奕君.湿地生态系统退化机制和驱动力的模型构建:以天津地区湿地为例[J].湿地科学与管理,2013,9(3):48-51.
- [4] 董淑萍.南大港湿地生态脆弱性分析[J].南水北调与水利科技,2010,8(5):178-180,183.
- [5] 王春泽,乔光建.河北省沿海湿地现状评价与保护对策[J].南水北调与水利科技,2009,7(4):46-49.
- [6] 侯春良,张义文.河北省湿地退化分析及保护策略研究[J].水土保持研究,2007,14(5):362-365.
- [7] 孟伟庆,莫训强,李洪远,等.天津地区湿地退化特征与驱动因素的多变量相关分析[J].水土保持通报,2016,36(4):326-332.
- [8] 时鹏,汪亚峰,陈利顶.廊道式工程建设对土壤生态环境影响的 meta 分析[J].生态学杂志,2012,31(8):2029-2037.
- [9] Glass G V. Primary, secondary, and meta-analysis of research[J]. Educational Researcher, 1976,5(10):3-8.
- [10] 刘瀚林.围填海工程对海洋环境影响的 Meta 分析[D].辽宁大连:大连理工大学,2014.
- [11] 郑凤英,彭少麟.捕食关系的 Meta 分析[J].生态学报,1999,19(4):448-452.
- [12] 赵玲,王尔大.基于 Meta 分析的自然资源效益转移方法的实证研究[J].资源科学,2011,33(1):31-40.
- [13] 曾宪涛,冷卫东,郭毅,等. Meta 分析系列之一: Meta 分析的类型[J].中国循证心血管医学杂志,2012,4(1):3-5.
- [14] 李昱加.基于荟萃回归的中国贸易开放与二氧化碳排放关系研究[D].长沙:湖南师范大学,2018.
- [15] 颜俨,姚柳杨,郎亮明,等.基于 Meta 回归方法的中国内陆河流域生态系统服务价值再评估[J].地理学报,2019,74(5):1040-1057.
- [16] 张翼然,周德民,刘苗.中国内陆湿地生态系统服务价值评估:以 71 个湿地案例点为数据源[J].生态学报,2015,35(13):4279-4286.
- [17] Ghermandi A, van den Bergh J, Brander L M, et al. Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis[J]. Water Resour. Res., 2010,46: W12516.
- [18] Woodward R T, Wui Y S. The economic value of wetland services: a meta-analysis[J]. Ecological Economics, 2001,37(2):257-270.
- [19] 杨玲,孔范龙,郗敏,等.基于 Meta 分析的青岛市湿地生态系统服务价值评估[J].生态学杂志,2017,36(4):1038-1046.
- [20] 张玲,李小娟,周德民,等.基于 Meta 分析的中国湖泊湿地生态系统服务价值转移研究[J].生态学报,2015,35(16):5507-5517.
- [21] 徐贤君.基于 meta 分析法的滇池湿地价值评估[D].昆明:云南大学,2015.
- [22] Van Asselen S, Verburg P H, Vermaat J E, et al. Drivers of wetland conversion: a global meta-analysis [J]. Plos One, 2013,8(11): e81292.
- [23] 崔文彦,罗阳,王迎,等.海河流域湿地生态服务价值评价及对策研究[J].海河水利,2007(6):13-16.
- [24] 孙雪,于格,刘汝海,等.海河南系子牙河流域湿地生态系统健康评价研究[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2019,49(11):120-132.
- [25] 孙宝娣,崔丽娟,李伟,等.湿地价值评估尺度转换方法: Meta 分析研究概述[J].湿地科学与管理,2016,12(1):58-62.
- [26] 王洪翠,许维,张世禄.海河流域湿地区域生态安全评价[J].资源节约与环保,2013(11):163-164.
- [27] 秦磊,韩芳,宋广明,等.基于 PSR 模型的七里海湿地生态脆弱性评价研究[J].中国水土保持,2013(5):73-76.
- [28] 李文艳.天津滨海湿地生态系统退化指标体系的构建与评价研究[D].济南:山东师范大学,2011.
- [29] 李爽,申海鹏,张国臣.河北省滨海湿地可持续利用评价[J].安徽农学通报,2013,19(19):88-89,94.
- [30] 袁振杰.河北七里海潟湖湿地动态演变与环境整治研究[D].石家庄:河北师范大学,2008.
- [31] 赵志楠,张月明,梁晓林,等.河北省南大港滨海湿地退化评价[J].水土保持通报,2014,34(4):339-344.
- [32] 杨会利.河北省典型滨海湿地演变与退化状况研究[D].石家庄:河北师范大学,2008.
- [33] 李怡,殷克东,金雪,等.滨海湿地退化损失评估体系构建与实证[J].统计与决策,2018,34(2):52-56.
- [34] 张晓龙,刘乐军,李培英,等.中国滨海湿地退化评估[J].海洋通报,2014,33(1):112-119.
- [35] 邓建新,单路宝,贺德强,等.缺失数据的处理方法及其发展趋势[J].统计与决策,2019,35(23):28-34.
- [36] 刘鹏,张燕,李法平,等.数据清洗[M].北京:清华大学出版社,2018.
- [37] Van der Loo M, De Jonge E. Statistical data cleaning with applications in R[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated, 2018.
- [38] Chen D R. Essays on improving the econometric estimation of wetlands values via meta-analysis[D]. Columbus Ohio: the Ohio State University, 2010.
- [39] 曾龙.贵州草海湿地生态环境治理的法律对策研究[D].贵阳:贵州民族大学,2019.

金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2142-2151.

[11] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

[12] 何邵麟.贵州表生沉积物地球化学背景特征[J].贵州地质,1998,15(2):149-156.

[13] 党丽娜,梅杨,廖祥森,等.城市不同交通圈(带)土壤重金属多元统计分析及空间分布研究以武汉市为例[J].长江流域资源与环境,2016,25(6):925-931.

[14] Gier S, Johns W D. Heavy metal-adsorption on micas and clay minerals studied by X-ray photoelectron spectroscopy [J]. Applied Clay Ence, 2000,16(5/6):289-299.

[15] Heike B Bradl. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004,277(1):1-18.

[16] 李如忠,姜艳敏,潘成荣,等.典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J].环境科学,2013,34(3):1067-1075.

[17] 方盛荣,徐颖,魏晓云,等.典型城市污染水体底泥中重金属形态分布和相关性[J].生态环境学报,2009,18(6):2066-2070.

[18] 许兴斌,焦黎,王勇辉.夏尔西里自然保护区土壤重金属相关性分析及污染风险评价[J].水土保持研究,2015,22(5):336-341.

[19] 刘芳枝,胡俊良,刘劲松,等.南岭泡金山矿产集采区土壤重金属空间分布及风险评价[J].农业环境科学学报,2018,37(1):86-95.

[20] 马先杰,陆凤,陈兰兰,等.贵州锰矿区地表水体重金属污染及生态风险评价[J].环境科学与技术,2018,41(11):191-197.

[21] 毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等.太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2014,35(1):186-193.

[22] 姬艳芳,李永华,孙宏飞,等.凤凰铅锌矿区土壤—水稻系统中重金属的行为特征分析[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2143-2150.

[23] Schmitt D, Taylor H E, Aiken G R, et al. Influence of natural organic matter on the adsorption of metal ions onto clay minerals[J]. Environmental Science & Technology, 2002,36(13):2932-2938.

[24] 高太忠,张昊,周建伟.溶解性有机物对土壤中重金属环境行为的影响[J].生态环境学报,2011,20(4):652-658.

[25] 张玮萍,许超,夏北成,等.尾矿区污染土壤中重金属的形态分布及其生物有效性[J].湖南农业科学,2010(1):62-64,67.

[26] 钟晓兰,周生路,黄明丽,等.土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J].生态环境学报,2009,18(4):1266-1273.

[27] 童非,顾雪元.重金属离子与典型离子型有机污染物的络合效应研究[J].中国环境科学,2014,34(7):1776-1784.

[28] 何绪文,王宇翔,房增强,等.铅锌矿区土壤重金属污染特征及污染风险评价[J].环境工程技术学报,2016,6(5):76-483.



(上接第 352 页)

[40] 牛娇.天津市湿地资源演变规律与退化风险研究[D].天津:天津大学,2012.

[41] 张健,李佳芮,杨璐,等.中国滨海湿地现状和问题及管理对策建议[J].环境与可持续发展,2019,44(5):127-129.

[42] 张绪良,徐宗军,张朝晖,等.中国北方滨海湿地退化研究综述[J].地质论评,2010,56(4):561-567.

[43] 高德明.天津市湿地资源现状分析与保护利用的研究[D].北京:中国农业大学,2005.

[44] 陶丽婷.基于遥感信息的天津市滨海新区湿地变化研究[D].杭州:浙江大学,2018.

[45] 马冰然.子牙河流域湿地景观格局变化分析[D].山东青岛:中国海洋大学,2015.

[46] 刘克,赵文吉,杜强,等.北大港湿地动态变化特征研究[J].资源科学,2010,32(12):2356-2363.

[47] 高杰,高敏,赵志红,等.1987—2015 年七里海潟湖湿地景观格局变化及驱动力分析[J].水生态学杂志,2018,39(4):8-16.