

水足迹视角下华北平原典型县域土地整治生态绩效评价

刘 航, 胡永翔*, 尚国琲
(河北地质大学, 石家庄 050000)

摘 要:【目的】在水足迹视角下对华北平原典型县域(景县)土地整治生态绩效进行评价。【方法】基于 GROPWAT 计算土地整治前、后的蓝、绿、灰水足迹, 构建以 4 个整治工程为准则层、共 11 个指标的土地整治生态绩效评价体系。选用综合赋权法对景县 16 个乡镇进行生态绩效评价。【结果】土地整治实施后, 景县蓝、绿、灰水足迹均有所增加, 其中蓝水和灰水足迹增加显著; 景县整体生态绩效处于较好水平, 良等及以上乡镇共 8 个, 中等及以上乡镇共 13 个。阻碍景县生态绩效提升的主要障碍因素为: 新增水浇地提高率、新增道路硬化率、排灌密度提高率、旱地水利化程度提高率和生物丰度指数提高率。主要障碍类型为水利障碍和土地平整障碍, 次要障碍类型为道路障碍和生态障碍。【结论】随着土地整治工程的实施, 景县整体生态效益得到有效提高, 但对水资源存在负面影响。水足迹视角下华北平原区县土地整治生态绩效评价模式可为相似地区的土地整治工程建设提供理论参考和可行性范式。

关键词: 土地整治; 水足迹; 生态绩效; 综合赋权法

中图分类号: X321

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022221

OSID: 

刘航, 胡永翔, 尚国琲. 水足迹视角下华北平原典型县域土地整治生态绩效评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 115-121.

LIU Hang, HU Yongxiang, SHANG Guofei. Evaluating Ecological Benefit of Land Consolidation at County Scale in North China Plain Using Water Footprint Concept[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 115-121.

0 引 言

【研究意义】土地整治工程是人类利用与改造自然资源的重要手段。过度追求社会经济效益造成了一系列生态环境负面效应, 如水环境污染、农业面源污染加剧。水资源作为生态环境的最大刚性约束指标, 是建立以生态为核心的土地整治绩效评价模式的前提。

【研究进展】以往国内外针对水足迹的研究尺度较大, 多集中于全球、国家、流域及城市等热点区域。Zhuo 等^[1]和宋欣爽^[2]分别在 2016 年和 2017 年对黄河流域的作物水足迹进行了演算; Gobin 等^[3]在 2017 年对欧洲作物水足迹变化进行了研究; 冯变变等^[4]和龚严等^[5]分别研究了山西省和江苏省的作物水足迹变化。在计算作物水足迹时, 研究者多应用 CROPWAT 模型计算作物生长期内的蒸散量与灌溉需水量。例如, 张耘铨等^[6]利用该模型计算了黑龙江省西部玉米生育期内的需水量; 王忠波等^[7]则利用该模型对黑龙江省庆安县水稻生育期内的需水量进行了计算。操信春

等^[8]将水足迹与区域灌溉发展情况应用于农业用水效益评价指标体系中, 分析了中国 31 个省区农业用水效益的时空格局及其与灌溉用水效率指标之间的关系; 易武英等^[9]将农业经济增长与农业水资源利用进行了耦合, 探究平塘县农业用水与经济脱钩之间的关系。姜秋香等^[10]对黑龙江省 13 个地级市进行了农业水足迹计算, 结合水足迹强度分析其用水效率。张沛等^[11]在作物水足迹分析中进一步探讨了作物水足迹与国家及地方政策及社会经济活动之间的关系。总的来说, 以往对于土地整治生态绩效评价的大量研究成果主要体现在指标选取与体系构建、评价方法 2 个方面。在指标选取与体系构建方面, Pimentel 等^[12]在评价指标中引入了生物丰度, 欧阳真程等^[13]选取了土地平整度等 10 项指标。在评价方法方面, 国外研究者一般结合自身区域的特点, 多以定量评价指标为主, 而国内多选取特尔斐法、多因素综合评价法和模糊综合评价法等主观评价方法。

【切入点】截至目前, 水足迹视角下的土地整治生态绩效评价模式鲜有报道。此模式有望保证项目在取得预期效果的同时减少对生态环境的破坏, 以追求项目绩效、水资源和生态环境的协调统一发展。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究以华北平原典型县域(景县)作为研究区域, 将蓝、绿、灰水足迹引入

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 河北省社会科学基金项目(HB20YJ032)

作者简介: 刘航(1997-), 女, 硕士, 主要从事土地资源管理研究。

E-mail: 2631757592@qq.com

通信作者: 胡永翔(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要从事土地规划与整治研究。E-mail: doctorhu110@163.com

评价指标体系,进行生态绩效评价,在此基础上探寻阻碍生态绩效提高的障碍因素和类型,针对景县的实际情况,提出未来土地整治的可持续发展策略。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

景县位于水资源匮乏的华北平原北部。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,光热条件满足冬小麦和夏玉米的生产需求。景县作为农业大县,水资源的供需平衡是协调当地农业发展和生态稳定的关键因素。景县国土资源局根据《景县土地利用总体规划》,对该地区开展了高标准农田建设。项目区实施范围主要涉及景县下辖的 16 个乡镇。

1.2 数据来源

本文的数据主要分为以下 4 类:①气象数据,来源于国家气象局;②统计数据,来源于 2017 年和 2020 年《衡水市年鉴》、《河北农村统计年鉴》、《景县统计年鉴》和《项目设计规划报告》;③调查数据,来源于实地调研;④地理空间数据,来源于遥感影像。

2 研究方法及模型构建

2.1 作物水足迹

2.1.1 蓝、绿水足迹

根据《水足迹评价手册》^[14],绿水和蓝水足迹计算式为:

$$\begin{cases} WF_{\text{proc,green}} = \frac{CWU_{\text{green}}}{Y} = \frac{10 \times ET_{\text{green}}}{Y} \\ WF_{\text{proc,blue}} = \frac{CWU_{\text{blue}}}{Y} = \frac{10 \times ET_{\text{blue}}}{Y} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $WF_{\text{proc,green}}$ 和 $WF_{\text{proc,blue}}$ 为作物生长绿水足迹和蓝水足迹 (m^3/t); CWU_{green} 和 CWU_{blue} 为作物生育期内消耗的绿水量和蓝水量 (m^3/hm^2); ET_{green} 和 ET_{blue} 为作物绿水和蓝水蒸散发量 (mm); Y 为单位面积作物产量 (t/hm^2)。

在理想生长条件下,单一降水供应下的蒸散发量就是绿水足迹的蒸散发量,为作物总蒸散量与有效降水量中的最小值;灌溉用水的蒸散发量就是蓝水足迹的蒸散发量,为作物总蒸散量与有效降水量之差^[15];当有效降水量大于作物蒸散发量时,取 0^[16]。计算式为:

$$\begin{cases} ET_{\text{green}} = \min(ET_c, P_{\text{eff}}) \\ ET_{\text{blue}} = \max(0, ET_c - P_{\text{eff}}) \\ ET_c = K_c \times ET_0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: ET_c 为作物蒸散发量 (mm); P_{eff} 为在作物生育期内的有效降水量 (mm); K_c 为作物系数,本文选取

冬小麦作物系数 $K_c=0.82$,夏玉米作物系数 $K_c=0.89$ ^[17]; ET_0 为参考作物蒸腾蒸散发量。本文 ET_0 和 P_{eff} 是根据研究区的气象数据,利用 CROPWAT 软件计算得出。有效降水量计算式为:

$$P_{\text{eff}} = \begin{cases} P \left(\frac{125-0.6P}{125} \right) & P \leq \left(\frac{250}{3} \right) \text{mm} \\ \frac{125}{3} + 0.1P & P > \left(\frac{250}{3} \right) \text{mm} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: P_{eff} 为作物生育期内的有效降水量 (mm); P 为作物生育期总降水量 (mm)。

2.1.2 灰水足迹

灰水足迹是指将污染物稀释到一定物质的量浓度所需的淡水量,根据《水足迹评价手册》^[14],计算式为:

$$WF_{\text{grey}} = \frac{(a \times AR) / (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})}{Y}, \quad (4)$$

式中: WF_{grey} 为灰水足迹 (m^3/t); a 为氮肥淋失率,取值为 7.4%^[18]; AR 为单位面积土地的化肥施用量 (kg/hm^2); C_{max} 为污染物的最大容许物质的量浓度,取自《地表水环境质量标准》中硝酸盐的标准限值 $0.01 \text{ kg}/\text{m}^3$; C_{nat} 为受纳水体的自然本底物质的量浓度,按照《水足迹评价手册》取值为 0; Y 为冬小麦和夏玉米单位面积产量 (kg/hm^2)。

2.1.3 区域水足迹

区域蓝、绿、灰水足迹计算为:

$$W = WF \times T, \quad (5)$$

式中: W 为区域蓝、绿、灰水足迹 (m^3); WF 为作物单位产量的蓝、绿、灰水足迹 (m^3/t); T 为区域作物产量 (t)。

2.2 水足迹视角下县域土地整治生态绩效评价

2.2.1 评价指标体系

评价指标体系以土地整治生态绩效为目标层,土地平整、田间道路、农田水利和生态防护工程为准则层,结合蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹,并从每个具体工程中选取的指标共同作为指标层。根据科学性、系统性、可行性和代表性原则,按照土地整治工程项目分类,询问相关专家并结合相关理论指导,从“田、水、路、林”4 个方面选取了 11 个评价指标,如表 1 所示。

2.2.2 权重计算方法

本文选用 AHP 层次分析法与熵权法组合而成的主客观综合赋权法来进行权重计算,计算式为:

$$W_j = \frac{\alpha_j + \beta_j}{2}, \quad (6)$$

式中: W_j 为综合权重; α_j 和 β_j 分别为 AHP 层次分析法和熵权法计算的指标权重。表 2 为综合权重的计算结果。

表 1 水足迹视角下土地整治生态绩效评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of ecological performance of county land rehabilitation from the perspective of water footprint			
目标层	准则层	指标层	计算式
A 景县 土地 整治 生态 绩效 评价	B1 土地 平整工程	C1 景观破碎度变化率	景观破碎度变化率=(整治后景观破碎度/整治前景观破碎度)-1
		C2 新增水浇地提高率	新增水浇地提高率=(整治后水浇地占总面积比例-整治前水浇地占总面积比例)/ 整治前水浇地占总面积比例×100%
		C3 绿水足迹变化率	绿水足迹变化率=(整治后绿水足迹-整治前绿水足迹)/整治前绿水足迹
	B2 田间 道路工程	C4 新增道路硬化率	新增道路硬化率=新增道路硬化面积/总面积×100%
		C5 田间道路密度提高率	田间道路密度提高率=田间道路增量/总面积×100%
	B3 农田 水利工程	C6 排灌密度提高率	排灌密度提高率=沟渠增量/总面积×100%
		C7 旱地水利化程度 提高率	旱地水利化程度=水浇地面积/(旱地面积+水浇地面积)×100% 旱地水利化程度提高率=整治后旱地水利化程度-整治前旱地水利化程度
		C8 蓝水足迹变化率	蓝水足迹变化率=(整治后蓝水足迹-整治前蓝水足迹)/整治前蓝水足迹
	B4 生态 防护工程	C9 生物丰度指数提高率	生物丰度指数=(0.5×林地面积+0.3×水域面积+0.15×草地面积+0.05×其他面积)/总面积 ^[19] 生物丰度指数提高率=(整治后生物丰度指数-整治前生物丰度指数)/整治前生物丰度指数×100%
		C10 植被覆盖指数提高率	植被覆盖指数=(0.5×林地面积+0.3×草地面积+0.2×耕地面积+0.2×园地面积)/总面积 ^[20] 植被覆盖指数提高率=(整治后植被覆盖指数-整治前植被覆盖指数)/整治前植被覆盖×100%
		C11 灰水足迹变化率	灰水足迹变化率=(整治后灰水足迹-整治前灰水足迹)/整治前灰水足迹

表 2 综合权重计算结果

Table 2 Comprehensive weight calculation result				
目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重
A 土地整治生态绩效评价	B1 土地平整工程	0.215 6	C1 景观破碎度变化率	0.142 8
			C2 新增水浇地提高率	0.038 8
			C3 绿水足迹变化率	0.034 0
	B2 田间道路工程	0.175 0	C4 新增道路硬化率	0.066 0
			C5 田间道路密度提高率	0.109 0
	B3 农田水利工程	0.332 7	C6 排灌密度提高率	0.053 9
			C7 旱地水利化程度提高率	0.175 9
			C8 蓝水足迹变化率	0.102 9
	B4 生态防护工程	0.276 9	C9 生物丰度指数提高率	0.056 3
			C10 植被覆盖指数提高率	0.069 9
			C11 灰水足迹变化率	0.150 6

2.2.3 等级划分

根据土地整治生态绩效评价分数进行等级划分。
该区域土地整治生态绩效评价得分计算式为：

$$P_j = \sum_{j=1}^m W_j F_j, \quad (7)$$

式中： P_j 为 j 区域生态绩效评价分数； W_j 为 j 指标的综合权重； F_j 为 j 指标标准化后的值； m 为评价指标的个数。

2.3 障碍度

为了进一步研究土地整治生态绩效评价中的阻碍因素，基于土地整治生态绩效评价结果，引入障碍度模型，对影响土地整治生态绩效评价的主要阻碍因素进行定量分析。根据障碍度判断因素影响程度，并确定阻碍土地整治生态绩效提高的限制性因素^[21]，计算式为：

$$P_i = \frac{(W_i \times X_{ij}) \times (1 - X_{ij})}{\sum_{i=1}^n [(1 - X_{ij}) \times (W_i \times X_{ij})]}, \quad (8)$$

式中： P_i 为障碍度； W_i 表示第 i 个指标的权重； x_{ij} 为指标标准化后的值； X_{ij} 代表第 i 个指标所属的准则层 j 的权重； W_i 与 X_{ij} 的乘积为贡献度； $(1 - X_{ij})$ 反映指标的偏离度。

3 结果与分析

3.1 景县整治后水足迹变化

3.1.1 作物水足迹变化

由图 1 可知，在整治前的作物水足迹构成比例中，夏玉米的蓝水足迹最低，灰水足迹最高，而冬小麦的绿水足迹最低，灰水足迹最高。整治后，夏玉米的蓝、灰水足迹增加。冬小麦的灰水足迹从 983.38 m³/t 降至 934.33 m³/t，这是由于灌溉设施提高了灌溉效率，有效稀释了农田土壤中的污染物。

3.1.2 区域水足迹变化

图 2 为土地整治前、后景县 16 个乡镇的粮食产量及蓝、绿、灰水足迹的变化情况。由图 2(a)可知，16 个乡镇粮食产量均有所增加，其中杜桥镇增加最多，为整治前的 1.5 倍。土地整治使景县粮食产量得到明显改善，增加了当地经济效益。由图 2(b)可知，75%的乡镇绿水足迹有所增加，王谦寺镇的增加率最高，为 24%。由图 2(c)可知，蓝水足迹有所增加，说明整治后满足了作物对灌溉水的需求。图 2(d)中，灰水足迹变化同样呈增加趋势。

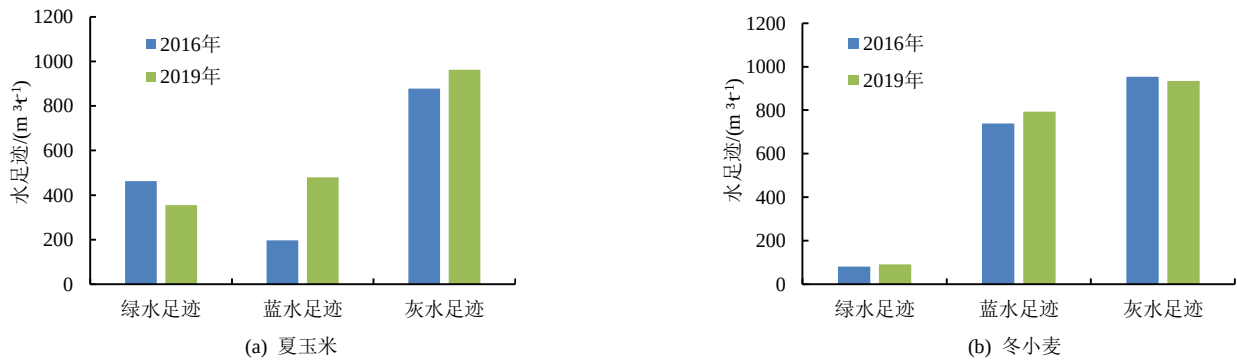


图1 土地整治前、后夏玉米和冬小麦单位产量的水足迹

Fig.1 Results of water footprint per unit yield of winter wheat and summer maize before and after land consolidation

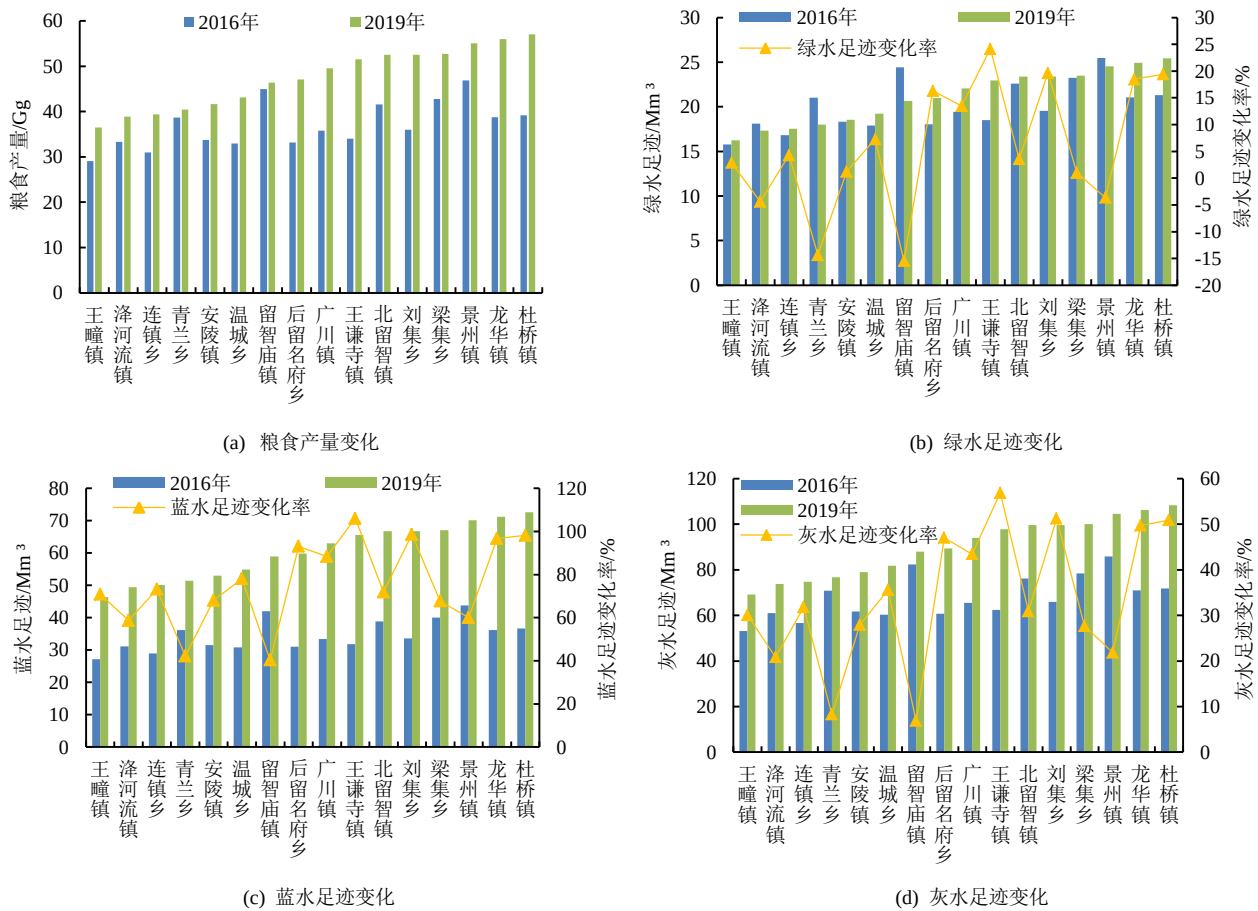


图2 土地整治后景县16个乡镇蓝、绿、灰水足迹变化

Fig.2 Changes in blue-green-grey water footprints of 16 townships in Jing County after land consolidation

3.2 景县整治后生态绩效评价结果

如图3所示, 景县生态绩效整体较高, 有13个乡镇处于中等及以上水平, 8个乡镇处于良等以上水平。从等级的空间分布来看, 整体呈以优等为中心, 向外围辐射的特点。经过整治, 后留名府乡、温城乡、王谦寺镇、杜桥镇和刘集乡5个乡镇为优等, 其中4个乡镇聚集在景县的中心偏西部。龙华镇、北留智镇和连镇乡3个乡镇为良等, 与优等乡镇接壤。泽河流镇和景州镇, 青兰乡、王瞳镇和留智庙镇5个乡镇为中等, 差等的乡镇则处于景县的外围, 距离优等的乡镇较远。

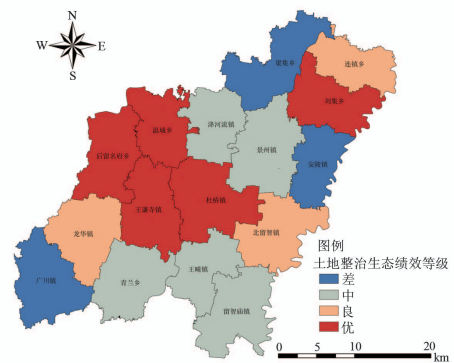


图3 土地整治生态绩效等级分布

Fig.3 Land remediation ecological performance rating map

3.3 景县整治后生态绩效障碍度分析

3.3.1 障碍度因素分析

如表 3 所示，新增水浇地提高率、新增道路硬化率、排灌密度提高率、旱地水利化程度提高率和生物丰度指数提高率为最主要的障碍因素。安陵镇、北留智镇和景州镇最主要的障碍因素是新增水浇地提高率；留智庙镇和青兰乡最主要的阻碍因素是绿水足迹

变化率；后留名府乡、连镇乡、刘集乡和王谦寺镇最主要的阻碍因素是田间路网密度提高率；杜桥镇、王瞳镇和温城乡最主要的障碍因素是排灌密度提高率。梁集乡和龙华镇最主要的阻碍因素是旱地水利化提高率，泽河流镇最主要的障碍因素为蓝水足迹变化率。广川镇最主要的障碍因素是灰水足迹变化率。

表 3 影响土地整治生态绩效的障碍度排序

Table 3 The ranking of obstacles affecting the ecological performance of land remediation

乡镇	障碍因素 1	障碍因素 2	障碍因素 3	障碍因素 4	障碍因素 5	障碍因素 6	障碍因素 7	障碍因素 8	障碍因素 9	障碍因素 10	障碍因素 11
安陵镇	C6	C1	C4	C4	C8	C11	C3	C7	C9	C10	C2
北留智镇	C11	C1	C4	C5	C7	C9	C3	C10	C8	C6	C2
杜桥镇	C3	C11	C9	C8	C4	C1	C5	C7	C6	C2	C10
广川镇	C8	C2	C11	C10	C6	C5	C9	C3	C4	C7	C1
后留名府乡	C3	C7	C6	C5	C1	C4	C11	C10	C9	C2	C8
泽河流镇	C7	C5	C2	C3	C8	C11	C10	C1	C4	C9	C6
景州镇	C7	C1	C3	C4	C11	C10	C9	C5	C6	C8	C2
连镇乡	C8	C10	C7	C6	C1	C11	C4	C3	C2	C5	C9
梁集乡	C9	C6	C7	C7	C3	C11	C1	C2	C4	C10	C5
刘集乡	C11	C8	C10	C9	C1	C6	C2	C5	C3	C4	C7
留智庙镇	C7	C4	C1	C2	C9	C8	C9	C5	C6	C9	C3
龙华镇	C5	C10	C9	C8	C11	C2	C1	C4	C6	C3	C7
青兰乡	C8	C6	C1	C2	C10	C4	C3	C7	C5	C11	C9
王谦寺镇	C3	C8	C10	C10	C1	C4	C5	C7	C6	C2	C9
王瞳镇	C5	C6	C3	C3	C11	C1	C2	C10	C9	C7	C8
温城乡	C3	C8	C7	C6	C2	C1	C5	C8	C8	C4	C8

3.3.2 障碍类型分析

如图 4 所示，景县整体以土地平整障碍型和水利障碍型为主，道路障碍型和生态障碍型为辅。景县属于平整障碍型的 5 个乡镇呈倒“L”型分布在景县的中南部，主要受到水浇地景观破碎度、新增水浇地面积和绿水足迹的限制。7 个水利障碍型乡镇分布于平整障碍型乡镇两侧，主要受排灌密度、旱地水利化程度和蓝水足迹的限制。道路障碍型和生态障碍型的乡镇位于景县边缘区域，主要受新增道路硬化率、田间道路密度和灰水足迹的限制，可以选用柔性材料对路面进行硬化处理并加强土壤肥料监测管理的同时改进施肥方式，降低农业化肥所带来的污染，提高生态绩效等级。

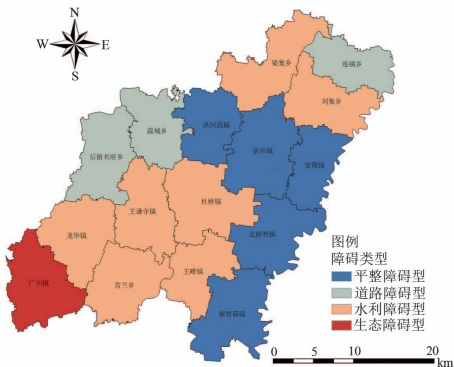


图 4 障碍类型

Fig.4 Obstacle type result graph

4 讨论

本研究以水足迹为视角，对景县土地整治生态绩效进行评价后分析其障碍度。在评价方法上利用主客观相结合的方法，弥补了传统单一评价方法的局限。将水足迹与生态相结合，拓展了水足迹理论研究范畴，并为其应用于土地整治生态评价提供了新的思路。鉴于数据获取方面的难度，本研究仍存在一定不足，后续应在灰水足迹计算方面重点考虑地下水的影响。

本研究从整治、规划和管理方面重点提出以下优化策略：①政策方面，应当制定生态效益与经济、社会效益并重的政策，使生态意识深入区域内每位村民。②在规划方面，不要仅限于单一因素的整治，应使各工程间紧密结合，各相关部门共同推进因地制宜土地整治项目，并针对障碍类型着重加强建设以达到生态绩效最大化。③在管理方面，应高度重视农业技术的应用以实现机械化发展。在现有土地整治生态绩效成果的基础上，鼓励村民自发通过村组织进行村内交换并地等方式，实现家庭连片耕种，以便于利用农业机械代替劳动力而达到提高农业生产水平和效益的目的。

5 结论

1) 通过将蓝、绿、灰水足迹纳入评价指标，构

建水足迹视角下县域土地整治生态绩效评价方法,并运用主客观赋权法计算指标权重,得到生态绩效等级结果。经过土地整治后,景县生态绩效处于较高水平。

2) 新增水浇地提高率、新增道路硬化率、排灌密度提高率、旱地水利化程度提高率和生物丰度指数提高率为主要阻碍因素。从障碍类型来看,景县整体以水利障碍型和土地平整障碍型为主,道路障碍型和生态障碍型为辅。

参考文献:

- [1] ZHUO La, MEKONNEN Mesfin M, HOEKSTRA Arjen Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961—2009)[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 87: 29-41.
- [2] 宋欣爽. 黄河流域主要粮食作物生产水足迹研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
SONG Xinshuang. Study on production water footprint of main grain crops in Yellow River Basin[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [3] GOBIN A, KERSEBAUM K, EITZINGER J, et al. Variability in the water footprint of arable crop production across European regions[J]. *Water*, 2017, 9(2): 93.
- [4] 冯变变, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 山西省作物生产蓝绿水足迹核算及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 200-205, 214.
FENG Bianbian, LIU Xiaofang, ZHAO Yonggang, et al. Estimate of blue and green water footprint of crop production and analysis of its influencing factors in Shanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 200-205, 214.
- [5] 龚严, 马彦彬, 赵梳玥, 等. 1996—2015 年江苏农作物播种水足迹变化及其驱动因子分析[J]. *江苏水利*, 2018(5): 1-6.
GONG Yan, MA Yanbin, ZHAO Shutan, et al. Analysis on change of crop water footprint and its driving factors in Jiangsu Province in 1996—2015[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2018(5): 1-6.
- [6] 张耘铨, 刘继龙, 聂堂哲. 基于 CROPWAT 模型的玉米需水量及灌溉制度研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(7): 67-75.
ZHANG Yunquan, LIU Jilong, NIE Tangzhe. Water requirement and irrigation schedule of maize based on the CROPWAT model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(7): 67-75.
- [7] 王忠波, 王欣亮, 聂堂哲. 基于 CROPWAT 模型水稻需水量及灌溉制度研究[J]. *东北农业大学学报*, 2019, 50(7): 87-96.
WANG Zhongbo, WANG Xinliang, NIE Tangzhe. Study on water requirement and irrigation schedule of rice based on CROPWAT model[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2019, 50(7): 87-96.
- [8] 操信春, 任杰, 吴梦洋, 等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 1-8.
CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(5): 1-8.
- [9] 易武英, 苏维词, 李威, 等. 基于水足迹的贵州省平塘县农业用水与经济脱钩分析[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(4): 295-300, 307, 357.
YI Wuying, SU Weici, LI Wei, et al. Analysis of agricultural water use and economic decoupling in Pingtang County of Guizhou Province based on water footprint[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(4): 295-300, 307, 357.
- [10] 姜秋香, 李鑫莹, 王子龙, 等. 黑龙江省农业水足迹时空分布及用水效率分析[J]. *东北农业大学学报*, 2020, 51(11): 87-96.
JIANG Qiuxiang, LI Xinying, WANG Zilong, et al. Spatio-temporal distribution of agricultural water footprint and analysis of water use efficiency in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2020, 51(11): 87-96.
- [11] 张沛, 龙爱华, 海洋, 等. 1988—2015 年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究: 基于农作物水足迹的统计分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 242-253.
ZHANG Pei, LONG Aihua, HAI Yang, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988—2015: Based on statistical analysis of crop water footprint[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1): 242-253.
- [12] PIMENTEL D, WILSON C, MCCULLUM C, et al. Economic and environmental benefits of biodiversity[J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 747-757.
- [13] 欧阳真程, 赵小敏, 张晗, 等. 鄱阳湖平原区土地整治项目生态效益评价: 以江西省鄱阳县为例[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(2): 123-128.
OUYANG Zhencheng, ZHAO Xiaomin, ZHANG Han, et al. Evaluation of ecological benefit of land reclamation project in Poyang Lake plain: A case study of Poyang County, Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(2): 123-128.
- [14] ALDAYA Maite M, CHAPAGAIN Ashok K, HOEKSTRA Arjen Y, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Taylor and Francis, 2012.
- [15] 高凡, 李玉中, 郭家选, 等. 农产品水足迹评价研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 1 071-1 080.
GAO Fan, LI Yuzhong, GUO Jiaxuan, et al. A review of water footprint assessment for agricultural products[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7): 1 071-1 080.
- [16] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 新疆主要农作物生产水足迹计算分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(6): 195-200, 235.
XUAN Junwei, ZHENG Jianghua, LIU Zhihui. Calculation and analysis on water footprint of main crops in Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(6): 195-200, 235.
- [17] 曹大禹, 吴鑫淼, 郝志红. 华北平原冬小麦-夏玉米作物亏缺水量空间分布研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(4): 107-111, 115.
CAO Dayu, WU Xinmiao, QIE Zhihong. Research on the inter-annual variation of water requirements and water deficits in winter wheat-summer maize in North China Plains[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(4): 107-111, 115.
- [18] 韩宇平, 曲唱, 贾冬冬. 河北省主要农作物水足迹与耗水结构分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 121-128.
HAN Yuping, QU Chang, JIA Dongdong. Analysis of water footprint and water consumption structure of major crops in Hebei Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(10): 121-128.
- [19] 梁甜甜, 王筱明. 土地整治工程实施的生态绩效评价: 以济南市商河县为例[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(11): 161-167.
LIANG Tiantian, WANG Xiaoming. Ecological performance evaluation of land consolidation project implementation: Taking Shanghe County of Jinan City as an example[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(11): 161-167.
- [20] 杨晓艳. 土地开发整理规划战略环境影响评价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
YANG Xiaoyan. Study on strategic environment impact assessment resulting from land development and consolidation planning[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [21] 朱士鹏, 徐兵, 毛蒋兴. 城市生态系统健康及其障碍度评价: 以南宁市为例[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(3): 96-102.
ZHU Shipeng, XU Bing, MAO Jiangxing. The evaluation on urban ecosystem health and its obstacle degree: A case study on Nanning City[J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2015, 39(3): 96-102.

Evaluating Ecological Benefit of Land Consolidation at County Scale in North China Plain Using Water Footprint Concept

LIU Hang, HU Yongxiang*, SHANG Guofei

(Hebei University of Geosciences, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: 【Objective】 Land consolidation is to improve the efficiency and productivity of segmented lands. The purpose of this paper is to evaluate its ecological gains at country scale in northern China Plain using the water footprint concept. 【Method】 The evaluation is based on the GROFWAT model. It calculates the blue, green and gray water footprint before and after land consolidation. The ecological performance of the land consolidation is evaluated using four specific remediation projects as the criteria layers, and 11 indicators. The method is applied to the 16 villages and towns in Jing County, Hebei province. 【Result】 Implementing the land consolidation increases the blue, green and gray water footprints in all villages and towns, especially the blue and gray water footprints which increase more significantly. The overall ecological performance of the 16 villages and towns in the county is good, with eight of them achieving good grade or above, and 13 reaching medium grade or above. The main obstacles hindering the improvement of ecological performance in the county are how to increase new irrigated land rate, hardening rate of new roads, drainage and irrigation intensity, turning rain-fed land to irrigated land, and biological diversity and abundance. The main obstacles are hydraulic land levelling, followed by road and ecological factors. 【Conclusion】 Overall, implementing the land consolidation can improve ecological benefits to Jing County, but it has a negative impact on water resources. The ecological performance evaluation model proposed in this paper is potential for evaluating land consolidation in other regions in northern China.

Key words: land consolidation; water footprint; ecological performance; comprehensive empowerment method

责任编辑：韩 洋

(上接第 99 页)

Use Cross-validation and Markov Chain to Assess the Reliability of Annual Runoff Classification for Wet and Dry Years Calculated by Different Methods

ZHANG Qin¹, LIU Saiyan^{1*}, XIE Yangyang^{1,2}, XI Haichao¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Modern Rural Water Conservancy Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: 【Objective】 Various methods have been proposed to classify changes in runoff in catchments, but how to assess their reliability remains a challenge. In this paper, we present a method to assess the reliability of the annual runoff classification for wet and dry years calculated by different methods. Its effectiveness was tested against data measured from a watershed. 【Method】 The reliability of the methods for classifying annual runoff for wet and dry years is analyzed based on their stability and predictability. The assessment is based on the cross-validation method and Markov chain method. We evaluate the stability and predictability of the classified results obtained by the mean-standard deviation method (MSD), gray relational analysis (GRA), and set-pair analysis (SPA). The difference in the classification and the transfer probability of the indices is established to evaluate the stability and predictability of the classified results. The proposed model is tested against annual runoff measured from 1956—2021 at the Tangnaihui Hydrological Station in the upper reaches of the Yellow River basin. 【Result】 ①Analysis using the cross-validation method and Markov chain showed that the results calculated by different classification methods vary, indicating that the stability and predictability of different methods are different. ②The classification difference index indicates that the GRA method is most stable and the MSD method is least stable. The transfer probability differences indicates that the GRA method has the best predictability and the MSD has the worst. ③Considering stability and predictability, the GRA method is most reliable for classifying annual runoff abundance and depletion, and the MSD method is the least. 【Conclusion】 The reliability of different methods for classifying annual runoff for wet and dry years varies for the same watershed. The method we developed from the cross-validation method and Markov chain can effectively assess the reliability of the results calculated by different classification methods.

Key words: reliability of wet-dry classification; cross validation; Markov chain; gray relational analysis; set pair analysis

责任编辑：白芳芳