

保护性耕作综合效益评价体系构建及实例分析

李洋阳, 刘思宇, 单春艳*, 姬亚芹

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要: 保护性耕作是防治农田土壤风蚀起尘的重要技术方法之一, 对于从源头上控制颗粒物污染有重要作用。为了综合评价保护性耕作技术的生态环境效益、社会效益和经济效益, 该研究构建了一个包含 3 个一级评价指标、8 个二级评价指标、19 个三级评价指标的综合效益评价指标体系, 并以天津市大港区苏家园村为例, 对传统耕作、免耕覆盖、深松耕 3 种耕作方式下的生态、经济、社会及综合效益进行评价, 以验证评价指标体系的可行性。结果表明: 从生态环境效益方面来看, 传统耕作<免耕覆盖<深松耕, 其指标值分别为 0.182、0.540、0.875; 从综合效益来看, 传统耕作<深松耕<免耕覆盖, 其指标值分别为 0.279、0.435、0.584。保护性耕作比传统耕作具有更高的生态环境和综合效益。该研究可为合理地评价保护性耕作综合效益提供参考, 对发展保护性耕作起到良好的导向作用。

关键词: 土壤; 侵蚀; 颗粒物; 保护性耕作; 综合评价; 模糊综合评价

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.007

中图分类号: S157.4⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0048-07

李洋阳, 刘思宇, 单春艳, 姬亚芹. 保护性耕作综合效益评价体系构建及实例分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 48—54. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.007 http://www.tcsae.org

Li Yangyang, Liu Siyu, Shan Chunyan, Ji Yaqin. Framework for comprehensive benefit assessment on conservation tillage and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 48—54. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.007 http://www.tcsae.org

0 引 言

近年来, 颗粒物污染成为中国大气污染的主要污染物之一, 根据环保部发布的 2013 年大气环境公报, 74 个执行新标准《环境空气质量》(GB3095-2012)的城市, 粒径小于 10 μm 的颗粒物 PM_{10} (particulate matter with diameter less than 10 μm) 年均浓度 (体积分数) 范围为 47~305 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均浓度 (体积分数) 为 118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 达标城市比例为 14.9%; 粒径 < 2.5 μm 的颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ (particulate matter with diameter less than 2.5 μm) 年均浓度 (体积分数) 范围为 26~160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均浓度 (体积分数) 为 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 达标城市比例仅为 4.1%, 环境空气质量不容乐观^[1]。全国一些主要城市的颗粒物源解析结果表明, 扬尘是城市颗粒物的主要来源之一, 如北京 $\text{PM}_{2.5}$ 本地排放源中扬尘占到了总来源的 14.3%, 天津则占到了 30%。而近郊农田土壤风蚀起尘又是形成扬尘的重要来源。防治农田土壤风蚀开放源是有效控制大气颗粒物污染的重要途径。

保护性耕作是目前比较常用的农田土壤风蚀防治技术。作为一种新型的农业耕作技术模式, 保护性耕作在

防治土壤风蚀、减少土壤起尘、从而改善城市及近郊空气质量上较传统耕作模式具有一定优势^[2-3]。与此同时, 保护性耕作技术也可以提高农民的收入, 达到增产创收的经济效果^[4]。如何合理地评价保护性耕作所带来的效益, 对发展保护性耕作有良好的导向性作用。为了客观定量地评估保护性耕作的作用和效益, 很多学者从不同角度开展了保护性耕作的效益评价研究。

在生态环境效益评估方面, 林本喜等^[5]从土壤理化性质方面评价了生态环境效益。Olivella 等^[6-8]研究发现, 保护性耕作技术可以增加土壤有机磷、有机碳、有机氮等有机质的含量以及微生物数量。徐阳春等^[9-11]发现, 在实施保护性耕作技术以后, 土壤内部各种生物和微生物之间能够建立更平衡的关系, 有效地抑制农田土壤病虫害的发生, 并减少除草剂的使用, 从而降低农民的投入成本。刘振东^[12]研究发现, 保护性耕作能有效预防土壤风蚀, 不同耕作模式的抗风蚀效率随覆盖度增加而增大。原君静等^[13]将保护性耕作技术按不同适应性分 I、II、III、IV、V 5 个等级, 选取了 18 个生态环境相关的指标, 将指标分为效益型指标、成本型指标、中间型指标、区间型指标, 以此对保护性耕作适应客观条件和内外部各种需要的能力进行了评价。

很多研究者从经济效益评估方面开展了研究。刘月楼等^[14]从农作物年产量上评价了保护性耕作的经济效益。周景奎等^[15]从投入成本和产值角度分析了经济效益。杨爱民等^[16]从用工角度分析了经济效益。王亚伟等^[17]研究认为经济投入是保护性耕作技术效益高低的首要评价指标。汤秋香等^[18]则在农民认知的基础上, 得出作物产

收稿日期: 2015-03-27 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 公益性行业 (环保) 科研专项 (200909005)

作者简介: 李洋阳, 男, 土家族, 湖北利川人, 主要从事大气颗粒物污染防治研究。天津 南开大学环境科学与工程学院, 300071。

Email: fomalhautyeti@foxmail.com

*通信作者: 单春艳, 女, 汉族, 吉林通榆人, 博士, 副教授, 主要从事大气颗粒物污染防治研究。天津 南开大学环境科学与工程学院, 300071。

Email: shanchy@nankai.edu.cn

量是影响农民选择保护性耕作技术的首要因素。许多研究发现，保护性耕作技术能提高农民农用机械使用强度、节省大量的时间和劳动力，增加农民的经济收益；能使农民选出最适合其土地农作物的栽培方式；有利于培育优质品种。田淑敏等^[19]建立了一个经济效益评价指标体系，朱钟麟等^[20]则构建了 4 层次、3 大类、24 项指标的评价体系，这 2 个指标体系能够较合理地反映保护性耕作技术的经济效益。社会效益评价指标的既有研究也较多：喻永红^[21]指出，农民认知过程和实际行为也是影响因素，稻农是否参加农业技术培训、受教育程度、是否兼业劳动力数量、未成年人数量显著影响保护性耕作的实施效果。国家政策和技术补贴是推进该技术的重要手段。李建兴等^[22-23]指出，保护性耕作技术的实施，对利用可再生资源、减少 CH₄ 排放、节能减排上意义重大。

目前关于保护性耕作技术的综合效益研究相对较少。高旺盛^[24]提出保护性耕作“三少两高”评价原则，陈源泉等^[25-26]在其基础上，提出了综合保护度综合反映指标，评价不同模式的优缺点。原君静等^[27]利用投影寻踪技术对保护性耕作的综合效益进行了评价，但是只选取了 8 个指标，评价覆盖面较窄；王敏等^[28]从经济效益和生态效益 2 个方面对甘肃省的保护性耕作效益进行了分析。

综上，既有研究大多是从保护性耕作技术的单方面效益评价入手，因此评价结果不能较全面反映生态、环境、经济、社会各方面影响。综合性评价研究较少，且指标覆盖不全面，尤其忽略了对土壤抗风蚀起尘能力的影响，即大气颗粒物污染方面的影响。为全面评价保护性耕作的综合效益，本文针对保护性耕作的评价方法进

行研究，建立一套综合评价指标体系反映不同保护性耕作技术的生态环境效益、社会效益和经济效益，运用科学的评价方法，确定影响保护性耕作技术效益的因子，并比较各种耕作模式的评价结果，以期评估得出综合效益较高的耕作技术。

1 保护性耕作评价指标体系

1.1 体系构建

指标的选取，对后期评价的科学性至关重要。本研究在遵循科学合理、具有层次性和易于评价等原则的基础上，大量查阅文献资料，选出运用较多或已经被基本公认的指标，以及较为重要的评价指标，较为广泛地向相关专家或学者征求对所选取指标的意见和建议，去掉明显不适宜的指标，同时还注意所选指标的变化与保护性耕作技术的实施应当存在较为明显的联系，最终建立了包括生态环境、社会、经济 3 方面效益的综合评价指标体系。

整个指标体系由生态环境效益、社会效益和经济效益 3 个一级评价指标、8 个二级评价指标、19 个三级评价指标构成（表 1）。生态环境效益评价指标包括土壤理化性质^[3,5,9,14,29-33]、土壤保水能力^[3,30,33]、杂草及病虫害指标^[9,11,34]以及土壤抗风蚀能力^[12,35]、5 类二级指标。社会效益评价指标包括农业机械化水平^[16]、每公顷劳动力转移人数^[27,36]2 类二级指标。由于保护性耕作对机械化要求较高，在优化农作工序等方面效果明显，对机械化的普及及劳动力节约有积极作用，符合社会的可持续发展目标，因此将农业机械化水平、每公顷劳动力转移人数列为社会效益指标。经济效益评价指标包括投入^[14-16,19]、产出^[14-17,19]2 类二级指标。

表 1 保护性耕作综合效益评价指标

Table 1 Indices for comprehensive benefit assessment of conservation tillage

一级 Grade I	权重 Weight	二级 Grade II	权重 Weight	三级 Grade III	权重 Weight
生态环境 效益指标 Eco-environmental indices C ₁	0.6855	土壤理化性质 Soil physical-chemical properties C ₁₁	0.3052	土壤容重 Soil bulk density C ₁₁₁ /(g·cm ⁻³)	0.0445
				土壤温度 Soil temperature C ₁₁₂ /℃	0.0445
				土壤 pH Soil pH C ₁₁₃	0.0629
				土壤电导率 Soil electrical conductivity C ₁₁₄ /(S·m ⁻¹)	0.0459
				土壤有机质 Soil organic matter C ₁₁₅ /(g·kg ⁻¹)	0.0629
				土壤微生物量 Soil microorganism C ₁₁₆ /(μg·g ⁻¹)	0.0445
		土壤保水能力 Water retention ability of soil C ₁₂	0.0924	土壤含水率 Soil water content C ₁₂₁ /%	0.0451
				水分利用效率 Soil moisture utilization rate C ₁₂₂ /(kg·(hm ⁻² ·mm ⁻¹))	0.0473
		土壤抗风蚀能力 Soil resistance to wind erosion C ₁₃	0.1075	土壤抗风蚀效率 Soil anti-erosion efficiency C ₁₃₁ /%	0.0629
				土壤起尘量 Soil particulate emission rate C ₁₃₂ /(g·m ⁻²)	0.0446
社会效益指标 Social Indices C ₂	0.0629	杂草及病虫害 weeds, diseases and insects C ₁₄	0.1804	杂草种类 Weed species C ₁₄₁	0.0448
				杂草密度 Weed destiny C ₁₄₂	0.0453
				保苗率 Survival rate of seedling C ₁₄₃ /%	0.0445
				出苗率 Emergence rate C ₁₄₄ /%	0.0458
				病虫害数量 Diseases and insects C ₁₄₅	
经济效益指标 Economical Indices C ₃	0.2516	农业机械化水平 Agricultural mechanization rate C ₂₁ /%	0.0629	每公顷劳动力转移人数 Transfer of rural labor per hm ² C ₂₂	
		投入 Input C ₃₁	0.1887	人均用工投入 Labor cost C ₃₁₁ /(元·d ⁻¹)	0.0629
				农机消耗 Mechanical cost C ₃₁₂ /(元·hm ⁻²)	0.0629
		产出 Output C ₃₂	0.0629	农田原材料投入 Material cost C ₃₁₃ /(元·hm ⁻²)	
				作物产值 Production output C ₃₂₁ /(元·(hm ⁻² ·a ⁻¹))	0.0629

1.2 评价方法

本文选择模糊综合评价法对传统耕作模式与保护性耕作模式所带来的效益的优劣进行评价, 具体步骤如下^[37]:

1) 依据指标参数建立效益指标集 I

$$I = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 j 种耕作方式的第 i 个评价指标值; $i=1, 2, \dots, n$, n 为评价指标个数; $j=1, 2, 3$, 分别对应传统耕作、免耕覆盖、深松耕。

2) 建立效益评价等级集 R

由于指标体系所涉及的指标覆盖范围较广, 各指标的优劣标准并不一致, 而目前尚不存在一个系统的等级标准, 因此本文以 3 种耕作方式下各指标值的最优值作为评价的最优值, 通过比较 3 种耕作方式的综合效益优劣对它们进行评价。因此, 评价等级集 R 只包含 1 个因子, 记为 r_G , 表示“最优”等级。

3) 建立模糊相关矩阵 U

$$U = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{n1} & d_{n2} & d_{n3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: d_{ij} 为第 j 种耕作方式的第 i 个评价指标对于“最优”等级的隶属度。计算隶属度时, 选取 3 种耕作指标中的最优值为第 i 项指标的评价最优值, 又根据指标影响的不同, 可以将指标的隶属度函数分为 2 种类型:

正向指标 (越大越优型):

$$d_{ij} = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (3)$$

负向指标 (越小越优型):

$$d_{ij} = \frac{x_{i\max} - x_i}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (4)$$

式中: $x_{i\min}$ 和 $x_{i\max}$ 为 3 种耕作方式中第 i 个指标的最小和最大值。

4) 确定指标权重

指标权重是用来反映每一个评价指标在评价中, 在整体里所占有的相对重要程度。某一评价指标的权重越大就表示这个指标在整体评价里越重要。本文采用标准差法确定权重。在计算权重之前, 由于各评价指标的量纲、数量级及指标优劣的取向存在很大差异, 因此在建立初始矩阵前必须对原始数据进行标准化处理。此处采用线性法进行标准化, 由于其正向指标与负向指标的标准化计算式与式 (3) 和式 (4) 在形式上完全一样, 因此得出的标准化值与隶属度在数值上相同。权重计算公式如下:

$$w_i = \frac{S(x_{i0})}{\sum_{i=1}^n S(x_{i0})} \quad (5)$$

式中: $S(x_{i0})$ 为 3 种耕作方式第 i 个指标值的标准差; x_{i0}

为 x_i 的标准化值, 在数值上等于 d_{ij} ; w_i 为第 i 个指标的权重系数, 满足 $0 \leq w_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

5) 综合评价得分 v

$$v = W \cdot U \quad (6)$$

式中: W 为权重系数矩阵, U 为隶属度矩阵。

2 案例分析

2.1 研究区概况

本研究以天津市大港区苏家园村为例, 验证评价指标体系应用的可行性, 同时对当地保护性耕作技术的综合效益进行评价。天津市地处内蒙古黄土高原西南侧, 大港区 ($38^{\circ}50'23.99''N$ 、 $117^{\circ}27'31.82''E$) 位于天津市的东南部, 东部靠近渤海, 典型的温带大陆性气候, 四季分明, 年均气温为 $12.1^{\circ}C$, 主要种植作物为小麦、玉米和水稻。苏家园村的主要作物类型为玉米, 土壤盐碱性较大, 肥力不高, 保土性相对较差, 其保护性耕作多为少耕、免耕结合秸秆覆盖模式。

2.2 评价指标数据获取

本文对免耕覆盖和深松耕 2 种保护性耕作方式及传统耕作方式进行评价。免耕覆盖是指前茬作物收获后, 不翻耕土地, 把秸秆粉碎均匀覆盖, 直接用免耕施肥播种机播种, 喷洒除草剂; 深松耕是指前茬作物收获后, 不翻耕土地, 把秸秆粉碎, 用深松机深松至 30 cm, 免耕施肥播种机播种, 喷洒除草剂^[30]。

一部分评价指标的数据通过天津市大港区实际调查和试验研究获取。其中部分经济和社会效益指标数据通过在苏家园村采用入户问卷调查获得, 调查随机抽取了 14 户当地居民, 调查了研究区域农民耕作的生产、社会以及经济收入等基本情况; 生态环境效益指标中抗风蚀效率和起尘量的数据是根据于大港风洞试验区的试验数据计算得出; 其他指标引用于已有文献, 尽量选取与天津气候、土壤类型相近的研究文献。受数据所限, 对于免耕覆盖和传统耕作共有 19 个指标可以赋值。由于关于深松耕研究较少, 只有 11 个生态环境效益指标被赋值 (表 2)。需要注意的是, 指标赋值的缺失可能会导致未被赋值指标的效益被低估甚至忽视。

2.3 结果与分析

2.3.1 隶属度

由式 (3) 和式 (4) 计算出这 19 个指标的“最优”评价等级的隶属度 (表 3)。根据隶属度值, 将 19 个评价指标分别 2 类: 越小越优型包括 C_{111} (土壤容重)、 C_{132} (土壤起尘量)、 C_{142} (杂草密度)、 C_{145} (病虫害数量)、 C_{311} (人均用工投入)、 C_{312} (农机消耗)、 C_{313} (农田原材料投入); 越大越优型包括 C_{114} (土壤电导率)、 C_{115} (土壤有机质)、 C_{116} (土壤微生物量)、 C_{121} (土壤含水率)、 C_{122} (水分利用效率)、 C_{131} (土壤抗风蚀效率)、 C_{143} (保苗率)、 C_{144} (出苗率)、 C_{21} (农业机械化水平)、 C_{321} (作物产值)、 C_{112} (土壤温度)、 C_{113} (土壤 pH 值) 根据研究区气候、土壤等条件而定。本研究中, 天津作物生育期内气温和

地温较高，相对而言，降低地温到作物生长适宜范围有利于作物生长，故笔者将 C_{112} 定为越小越优越型指标， C_{113} 定为越大越优越型指标。

表 2 保护性耕作技术效益评价指标实际应用赋值表				
Table 2 Value assignments of indices for benefit assessment of conservation tillage				
指标 Indices	免耕覆盖 No-tillage	深松耕 Subsoiling	传统耕作 Traditional	数据来源 Reference
$C_{111}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.48	1.43	1.37	时均莲 ^[30] , 天津
$C_{112}/^{\circ}\text{C}$	19.8	19	20.7	李成军 ^[29] , 宁夏
C_{113}	6.67	/	6.24	王靖 ^[31] , 山东省胶州市
$C_{114}/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	7.13	7.54	6.08	曹伟鹏 ^[33] , 陕西省靖边县
$C_{115}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	11.62	/	10.42	刘月楼 ^[14] , 内蒙古黄陵县
$C_{116}/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	250.69	280.61	224.39	范丙全 ^[32] , 河北省衡水市
$C_{121}/\%$	17.4	16.4	14.6	时均莲 ^[30] , 天津市
$C_{122}/(\text{kg}(\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}))$	14.36	13.82	11.49	时均莲 ^[30] , 天津市
$C_{131}/\%$	88	/	60	赵雪艳 ^[35] , 天津市
$C_{132}/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	3.8	2.6	4.7	赵雪艳 ^[35] , 天津市
C_{142}	0.005	0.006	0.003	金亚征 ^[34]
$C_{143}/\%$	92	96	89	金亚征 ^[34]
$C_{144}/\%$	85	89	82	金亚征 ^[34]
C_{145}	25	20	18	金亚征 ^[34]
$C_{21}/\%$	57.1	/	38.0	调查问卷
$C_{311}/(\text{元}\cdot\text{d}^{-1})$	60	/	40	调查问卷
$C_{312}/(\text{元}\cdot\text{hm}^{-2})$	63.89	/	58.77	调查问卷
$C_{313}/(\text{元}\cdot\text{hm}^{-2})$	223.86	/	200.15	调查问卷
$C_{321}/(\text{元}(\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}))$	871.45	/	785.66	调查问卷

注：“/”表示难以获得数据，下同。
Note: “/” means data not available, same as below.

2. 3. 2 权重

受数据获取的限制，本研究中用于评价生态环境效益的 11 个指标全部能够赋值，但用于评价综合效益的 19 个指标未能全部赋值，可能会影响评价结果，故笔者针对这 2 种情况下分别计算评价指标权重。基于 19 个评价指标的权重系数见表 1。表 1 可以看出，生态环境效益评价指标 C_1 的权重值最大，为 0.6855；其次为评价经济效

益 C_3 的指标，权重为 0.2516；社会效益评价指标 C_2 权重最小，为 0.0629。基于 11 个生态环境效益指标的权重系数，如见表 3 所示。

表 3 不同耕作模式下评价指标隶属度及权重				
Table 3 Membership degrees and weights for indices in different tillage modes				
指标 Indices	隶属度 Membership degrees			11 个指标权重 Weights for 11 Indices
	免耕覆盖 No-tillage	深松耕 Subsoiling	传统耕作 Traditional	
C_{111}	0	0.462	1	0.0896
C_{112}	0.529	1	0	0.0896
C_{113}	1	/	0	/
C_{114}	0.719	1	0	0.0923
C_{115}	1	/	0	/
C_{116}	0.468	1	0	0.0896
C_{121}	1	0.643	0	0.0907
C_{122}	1	0.812	0	0.0952
C_{131}	1	/	0	/
C_{132}	0.429	1	0	0.0898
C_{142}	0.611	1	0	0.0903
C_{143}	0.667	1	0	0.0912
C_{144}	0.492	1	0	0.0895
C_{145}	0	0.714	1	0.0922
C_{21}	1	/	0	/
C_{311}	0	/	1	/
C_{312}	0	/	1	/
C_{313}	0	/	1	/
C_{321}	1	/	0	/

2. 3. 3 综合评价得分

基于上述 2 种情况分别获得 3 种耕作模式的生态效益评价结果，见表 4。以集中于评价生态环境效益的 11 个指标所得的综合评分来看，深松耕得分（0.875）最高，其次是免耕覆盖（0.540），最后是传统耕作（0.182），这说明深松耕和免耕覆盖的生态环境效益依次高于传统耕作。基于 19 个指标，发现免耕覆盖的生态环境效益（0.4571）>深耕覆盖（0.4347）>传统耕作（0.0903）。相比于 11 个指标评价结果，深耕略低于免耕覆盖，可见，由于深耕覆盖的部分指标未能赋值，导致各指标权重分配不同，进而低估了评价效益值。

表 4 三种耕作模式的综合评价得分					
Table 4 Comprehensive assessment values of three tillage modes					
耕作方式 Tillage types	基于 11 个指标 Based on 11 indices		基于 19 个指标 Based on 19 indices		
	生态环境效益 Eco-environmental benefit	生态环境效益 Eco-environmental benefit	社会效益 Social benefit	经济效益 Economical benefit	综合效益 Comprehensive benefit
传统耕作 Traditional tillage	0.182	0.0903		0.1887	0.279
免耕 No-tillage	0.540	0.4571	0.0629	0.0629	0.583
深松耕 Subsoiling tillage	0.875	0.4347			0.435

基于 19 个指标的综合评价得分中，由于深松耕部分欠缺数值，均以其没有比较优势计算，即按照默认值计算，仅比较了能够赋值的指标评价结果。从综合得分来

看，免耕覆盖得分（0.584）最高，其次为深松耕（0.435），最后为传统耕作（0.279），这说明免耕覆盖、深松耕和传统耕作方式的综合效益依次递减。经济效益方面，传

统耕作得分(0.1887)最高,免耕覆盖(0.0629)其次。从得分来看,传统耕作的经济效益高于免耕覆盖,这与刘月楼^[14]的研究结果相符,造成这一现象的原因可能是因为评价时着重考虑了耕作模式的单位经济效益,保护性耕作有更高的机械化要求和专业知识要求,这导致了单位人力成本与单位机械成本的相对较高。保护性耕作的生态环境效益和综合效益均高于传统耕作,该结果与陈源泉等^[26-28]的研究结果在总体趋势上相符,均肯定了保护性耕作在综合效益上相对于传统耕作的优势。

3 结论和讨论

本文综合考虑保护性耕作技术的生态环境效益、社会效益和经济效益,构建了保护性耕作技术综合效益评价指标体系,确定了具体的评价指标,并以天津市大港区苏家园村为例,从实际调查研究和相关文献中获取数据,选取相应指标给予赋值,对深松耕、免耕和传统耕作方式进行了评价。结果表明免耕和深松耕的生态环境效益和综合效益均高于传统耕作,其综合效益得分分别为 0.583、0.435 和 0.279。但是该评价体系尚存在一些需要注意的问题,在未来的改进与应用时,应当予以关注。

由于缺少相关的标准,在评价过程中无法将各指标划分为多个等级(例如,若评价水质指标则可借鉴国家水质标准划分为 I 类—V 类 5 个级别),这导致建立评价等级集 R 时只能以实测值的最优值作为评价最优值,最终的评价等级只有“最优”1 个等级。评价等级划分的单一使得最终的综合评价得分只能反映各个耕作模式优劣的趋势,无法体现其实际差异的大小;此外,评价等级划分的缺失还可能导致最终评价受到指标个数的影响,即有可能出现下属指标多则得分高的情况。因此在后续的工作中,应当着重对各指标的等级划分确定一个系统的标准。除此之外,研究案例的部分指标值缺乏或者难以获取,在评价过程中,指标值的缺失很可能导致了对该指标实际效益的低估,从而影响到最终的评价结果;此外,从文献中引用数据,可能存在引用文献的研究地点不同,使得评价所使用的指标值不能准确代表当地实际的情况,这也会导致评价结果无法反映评价地的真实情况。要解决这一问题,就需要对评价地区多开展基础性调查,更多的获取反映当时实际情况的评价指标数值。

在运用文中介绍的体系评价保护性耕作的综合效益时,应当考虑不同区域农耕条件的差异性,指标的标准规定应当符合当地的实际情况。部分指标在界定是越大越优型还是越小越优型指标时,尤其应当考虑当地的实际情况,例如,本文的土壤温度指标 C_{112} 就根据当地的土壤性质规定为了越小越优型。

总之,本研究中构建的保护性耕作综合效益评价指标体系,较已有研究相比更加着重考虑了防治土壤风蚀的生态和环境效益,评价的角度更加全面,在目前中国大气颗粒物污染日趋严重的背景下,具有重要的研究和应用价值,但是该方法的应用和完善,还需要更多的相关基础研究提供数据支持。

[参 考 文 献]

- [1] 中国环保部监测司. 2013 年中国环境状况公报[R]. 北京: 中国环保部, 2014.
- [2] Leys A, Govers G, Gillijns K, et al. Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 390(3): 143—154.
- [3] Sandal S K, Datt N, Sharma R P, et al. Effect of resource conservation technologies with common weed biomass and fertilizer levels on soil moisture content, productivity and nutrient content and uptake of maize (*Zea mays*) in wet temperate zone of Himachal Pradesh[J]. *Indian Journal of Agriculture Science*, 2009, 79(7): 545—548.
- [4] Hassan G, Khan, Naqib U, et al. Efficacy of herbicides on weed density and grain yield of no till wheat[J]. *International Journal of Biology and Biotechnology*, 2006, 3(1): 209—213.
- [5] 林本喜, 黄祖辉, 邓启明. 基于 AHP 的县域高效生态农业综合评价——以浙江富阳市为例[J]. *福建农林大学学报: 哲学社会科学版*, 2009, 12(2): 50—54.
Lin Benxi, Huang Zuhui, Deng Qiming. Comprehensive evaluation of county eco-efficient agriculture based on AHP: A case study of Fuyang City in Zhejiang Province[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Philosophy and Social Sciences*, 2009, 12(2): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [6] Olivella MA, Fernandez I, Cano, et al. Role of chemical components of cork on sorption of aqueous polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2013, 7(1): 225—234.
- [7] Musikavong C, Wattanachira S. Identification of dissolved organic matter in raw water supply from reservoirs and canals as precursors to trihalomethanes formation[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2013, 48(7): 760—771.
- [8] Ouyang Wei, Wei Xinfeng, Hao Fanghua. Long-term soil nutrient dynamics comparison under smallholding land and farmland policy in northeast of China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2013, 450/451(15): 129—139.
- [9] 徐阳春, 沈其荣. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89—95.
Xu Yangchun, Shen Qirong. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89—95. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shao Jingan, Tang Xiaohong, Wei Chaofu, et al. Effects of conservation tillage on soil organic matter in paddy rice cultivation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4434—4442.
- [11] 张舒, 张巧玲, 陈小山, 等. 不同栽培方式对水稻主要病虫害发生的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(4): 426—430.
Zhang Shu, Zhang Qiaoling, Chen Xiaoshan, et al. Effects of different cultivation model on the major rice diseases and insects occurrence[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(4): 426—430. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘振东. 保护性耕作措施对土壤风蚀的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Liu Zhendong. The Impact of Protective Cultivation Measures to Soil Wind Erosion[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2012. (in Chinese with English abstract)

- [13] 原君静, 李洪文. 保护性耕作适应性评价与模式选择方法研究[J]. 农机化研究, 2009, 7(7): 10—13.
Yuan Junjing, Li Hongwen. Study on suitability evaluation hierarchical system and model-selection methods of conservation tillage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 7(7): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘月楼, 种旭东, 刘桢, 等. 保护性耕作在小麦生产上的增产增效试验[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3): 46.
Liu Yuelou, Zhong Xudong, Liu Zhen, et al. Experiment for conservation tillage on the yield and efficiency improvement of wheat production[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010(3): 46. (in Chinese with English abstract)
- [15] 周景奎, 隋淑霞, 宇文剑飞. 机械化保护性耕作技术经济效益分析[J]. 农村牧区机械化, 2002(4): 74—77.
Zhou Jingkui, Sui Shuxia, Yuwen Jianfei. Economic benefit analysis of mechanized conservation tillage technology[J]. Mechanization in Rural & Pastoral Areas, 2002(4): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨爱民, 刘孝盈. 发展保护性耕作技术有效防治耕地土壤侵蚀[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(6): 47—52.
Yang Aimin, Liu Xiaoying. Developing conservation tillage to effectively control soil erosion on farmland[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(6): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王亚伟, 张香伟, 韩珂. 河南农业循环经济发展评价研究[J]. 广东农业科学, 2010, 9(3): 299—301.
Wang Yawei, Zhang Xiangwei, Han Ke. Research of assessment on agricultural circular economy development in Henan Province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 9(3): 299—301. (in Chinese with English abstract)
- [18] 汤秋香, 谢瑞芝, 章建新, 等. 典型生态区保护性耕作主体模式及影响农户采用的因子分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 469—477.
Tang Qiuxiang, Xie Ruizhi, Zhang Jianxin, et al. Analysis of conservation tillage pattern and the factors influencing farmers' adoption in typical ecological region in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 469—477. (in Chinese with English abstract)
- [19] 田淑敏, 刘瑞涵, 侯富强. 京郊农田保护性耕作技术实施效益的评价指标体系研究[J]. 北京农学院学报, 2006, 21(4): 50—53.
Tian Shumin, Liu Ruihan, Hou Fuqiang. Study on evaluation indicator system of conservation tillage technology implementary benefit in Beijing rural areas[J]. Journal of Beijing Agricultural College, 2006, 21(4): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱钟麟, 陈建康, 刘晓军, 等. 四川丘陵区节水农业效益综合评价指标体系与评价模型[J]. 山地学报, 2007, 25(4): 483—489.
Zhu Zhonglin, Chen Jiankang, Liu Xiaojun, et al. The assess index system and evaluation model of water-saving agricultural benefits in hilly area[J]. Sichuan Journal of Mountain Science, 2007, 25(4): 483—489. (in Chinese with English abstract)
- [21] 喻永红, 韩洪云. 农民健康危害认知与保护性耕作措施采用——对湖北省稻农 IPM 采用行为的实证[J]. 分析农业技术经济, 2012(2): 54—62.
Yu Yonghong, Han Hongyun. Correlation between the farmers' cognition of health hazard and conservation tillage measures: Empirical research on the application of IPM in Hubei province[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2012(2): 54—62. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李建兴. 保护性耕作技术与经济效益浅析[J]. 农业装备与车辆工程, 2009, 217(8): 67—69.
Li Jianxing. Analysis on protective farming and ronomic benefits[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2009, 217(8): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [23] 谭淑豪, 张卫建. 中国稻田节能减排的技术模式及其配套政策探讨[J]. 科技导报, 2009, 27(23): 96—100.
Tan Shuhao, Zhang Weijian. Technical patterns and incentive policies for energy saving and emission mitigation in the paddy field in China[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(23): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [24] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702—2708.
Gao Wangsheng. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(12): 2702—2708. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈源泉, 高旺盛, 隋鹏. 保护性耕作技术界定指标探讨[C]. 中国农作制度研究进展. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008: 280—284.
- [26] 陈源泉, 李媛媛, 隋鹏, 等. 不同保护性耕作模式的技术特征值及其量化分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 161—167.
Chen Yuanquan, Li Yuanquan, Sui Peng, et al. Technological characteristics and quantitative analysis of different conservation tillage patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 161—167. (in Chinese with English abstract)
- [27] 原君静, 李洪文. 基于投影寻踪技术的保护性耕作效益评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 175—179.
Yuan Junjing, Li Hongwen. Benefit evaluation of conservation tillage based on projection pursuit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 175—179. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王敏, 张锋伟. 甘肃省保护性耕作的发展现状及效益分析[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(1): 244—246.
Wang Min, Zhang Fengwei. Development status and benefit analysis of the conservation tillage in Gansu Province[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(1): 244—246. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李成军, 吴宏亮. 保护性耕作现状分析及宁夏发展保护性耕作的前景[J]. 农业科学研究, 2009, 30(2): 65—69.
Li Chengjun, Wu Hongliang. Current situation analysis of conservation tillage and development prospects for conservation tillage in Ningxia[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2009, 30(2): 65—69. (in Chinese with English abstract)
- [30] 时均莲. 天津市保护性耕作体系试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.
Shi Junlian. Experimental Research on Conservation Tillage System in Tianjin[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王靖, 林琪, 倪永君, 等. 不同保护性耕作模式对冬小麦产量及土壤理化性状的影响[J]. 青岛农业大学学报: 自然科学版, 2009, 26(4): 276—281.
Wang Jing, Lin Qi, Ni Yongjun, et al. Effect of yield of winter wheat and soil physical-chemical properties under

- different conversation tillage[J]. Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science, 2009, 26(4): 276—281. (in Chinese with English abstract)
- [32] 范丙全, 刘巧玲. 保护性耕作与秸秆还田对土壤微生物及其溶磷特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 130—132. Fan Bingquan, Liu Qiaoling. Effect of conservation tillage and straw application on the soil microorganism and P-dissolving characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 130—132. (in Chinese with English abstract)
- [33] 曹伟鹏. 毛乌素沙地南缘不同耕作措施土壤质量评价及经济效益研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011. Cao Weipeng. Soil Evaluation and Economic Benefits Analysis in Different Tillage Methods of the Mu Su Desert[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [34] 金亚征, 王莉, 刘朝巍. 中国玉米保护性耕作研究进展[J]. 河北北方学院学报: 自然科学版, 2009(3): 36—42. Jin Yazheng, Wang Li, Liu Chaowei. Review on China's research on corn conversation tillage[J]. Journal of Hebei North University: Natural Science, 2009(3): 36—42. (in Chinese with English abstract)
- [35] 赵雪艳. 天津市保护性耕作技术研究及其效益评价[D]. 天津: 南开大学, 2012. Zhao Xueyan. Research and Benefit Evaluation of Conservation Tillage Technology in Tianjin[D]. Tianjin: Nankai University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [36] 韩春梅. 龙口市农业发展现状与保护性耕作研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005. Han Chunmei. Status of Agricultural Development and Study on Conservation Tillage in Longkou City[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

Framework for comprehensive benefit assessment on conservation tillage and its application

Li Yangyang, Liu Siyu, Shan Chunyan^{*}, Ji Yaqin

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Considered as a health-harmful and climate-relevant pollutant, particulate matter (PM) has become a serious concern in China for recent years. Source apportionments of Chinese major cities show that fugitive dust can explain a large percentage of PM sources, while soil wind erosion contributes substantially to fugitive dust. Conservation tillage plays an important role in promoting crop growth and increasing production as well as in preventing wind erosion. Researches have been done to assess the benefits of conversation tillage in several perspectives respectively, whereas little concentrating on its comprehensive benefits. For better assessing the benefits of conservation tillage on eco-environmental, social and economic aspects comprehensively, a 3-tired index system was constructed based on field surveys, experiments and literatures, and tested in the case study of Tianjin. The assessment system included 3 indices of Grade-1 eco-environmental index, Grade-2 social index and Grade-3 economical index. Eco-environmental index included 4 sub-indices in Grade-2: soil physical-chemical properties, water retention ability of soil, soil resistance to wind erosion, and weeds and insects indices, respectively. Social index involved 2 sub-indices: agricultural mechanization rate, transfer of rural labor. The last 2 Grade -2 indices are input, and output subject to economical index. There were 19 more detailed indices in tire-3 to cover better range of this assessment. Three tillage modes utilized in Sujiayuan Village in Dagang District, Tianjin including traditional tillage and two kinds of conservation tillage (no-tillage with mulch and subsoiling) were analyzed to verify the feasibility of this index system. Fuzzy comprehensive evaluation (FCE) method was adopted and the weights of indices were calculated by standard deviation method in this assessment. The values of soil anti-erosion efficiency and soil particulate emission rate subject to soil resistance to wind erosion were calculated by a wind tunnel experiment conducted in Dagang district. A questionnaire survey was conducted in Sujiayuan Village to get values of agricultural mechanization rate and all the economical indices. An intensive literature research has been performed to get the rest of the indices' values considering the similarity of climate and agrotype between Sujiayuan Village and places from where those values were obtained. According to the coverage of data collected, an eco-environment assessment with 11 indices involved and a comprehensive assessment with 19 indices included were conducted respectively. The results showed that conservation tillage performed more benefits than traditional tillage on the eco-environmental, social and economic aspects. Traditional tillage, no-tillage with mulch and subsoiling scored 0.182, 0.540, 0.875 in eco-environment assessment, respectively, and 0.279, 0.435, 0.584, in comprehensive assessment, respectively. At last, several problems were noted for the further study or utilization: 1) Due to the lack of knowledge about standards of each indices, it's hard to define the detailed "rank" (or "evaluation value") of specific index, which lead to the result that this assessment value only reflectes the relative superiority but not the practical gaps of these tillage modes; 2) Most values of indices were obtained from literatures; Despite the similarity of climate and agrotype, significant biases may potentially exist; and 3) Geographical condition varies among different areas, it is rational to utilize this assessment method with local conditions carefully considered. This study provides a useful tool for comprehensive assessment of conservation tillage.

Key words: soils; erosion; particulate matters (PM); conservation tillage; comprehensive assessment; fuzzy evaluation