

基于小波-PSOSVM的陕甘宁新农业资源可持续利用评价

王辰璇¹, 陈莉², 张安安²

(1. 厦门理工学院 经济与管理学院, 厦门 361024;

2. 安徽建筑大学 经济与管理学院, 合肥 230601)

摘要:【目的】准确评价陕甘宁新农业资源可持续利用水平。【方法】本文选取陕甘宁新地区为研究对象, 从经济、科技、社会、自然环境、资源、生态治理 6 个方面构建了农业资源可持续利用的评价指标体系, 并结合 2018—2020 年的相关数据, 运用小波-PSOSVM 评价农业资源可持续利用水平。【结果】①小波-PSOSVM 农业资源可持续评价均方误差 MSE 为 $9.411\ 5 \times 10^{-5}$, 相关系数为 0.968; 而 PSOSVM 在同样的训练集以及同样的测试集下, 得到的均方误差 MSE 、相关系数分别为 0.015 3、0.967。小波处理后, PSOSVM 预测的精度有所提高, 收敛稍加快。②小波-SVM 农业资源可持续评价均方误差 MSE 为 20.836, 相关系数为 0.748; 而 SVM 在同样的训练集以及同样的测试集下, 均方误差 MSE 、相关系数分别为 30.903、0.634, 小波处理后, SVM 预测的精度提高, 收敛也稍快。【结论】PSO 优化后的 SVM, 预测的精度提高较多, 收敛也快很多。陕甘宁新地区农业资源可持续利用评价结果表明, 新疆排名第一, 甘肃排名第二, 陕西排名第三, 宁夏排名第四。

关键词: 小波分析; 微粒群算法; 支持向量机; 资源可持续利用评价

中图分类号: S812

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022222

OSID: 

王辰璇, 陈莉, 张安安. 基于小波-PSOSVM 的陕甘宁新农业资源可持续利用评价[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 96-103.

WANG Chenxuan, CHEN Li, ZHANG An'an. Sustainable Agricultural Resource Utilization in Northwestern China Determined Using the Wavelet-PSOSVM[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 96-103.

0 引言

【研究意义】西部大开发战略的推进, 促进了陕甘宁新地区经济发展, 减小了与发达省份的发展差异, 但该地区生态资源仍存在脆弱性。我国陕甘宁新地区地域广袤, 民族众多, 是我国重要的战略高地和生态屏障。2020 年《关于新时代推进西部大开发形成新格局的指导意见》指出, 西部大开发对于巩固西部生态壁垒、破除西部发展障碍具有重要意义。选取西部地区的代表省份陕西、甘肃、宁夏和新疆(以下简称“陕甘宁新”)为研究对象, 研究其农业资源的可持续利用问题具有重要意义。【研究进展】罗其友等^[1]提出农业资源可持续利用是一种低耗能高效益的资源利用方式, 为资源与环境的持续发展创造条件; 叶得明等^[2]、白晶等^[3]、丁金梅等^[4]均对生态环境与经济协调发展模式进行了分析。在农业资源可持续利用指标体系构建方面, 成果丰富。侯智惠等^[5]从农业资源、农业生态压力、农业生态保护、农业经济及社会发展等方面构建评价指标体系, 运用因子分析法确定权重, 并计算内蒙古自治区各盟(市)农业资源利用

的综合指数; 侯佳等^[6]以河北省 11 个地级市 2007—2016 年的农业资源为研究对象, 从经济、社会和生态方面构建指标体系, 运用熵权法和 DEA 模型进行实证分析; 陈家金等^[7]从土地资源、水资源、畜牧资源、农村能源、生产条件、农业效益等方面构建指标体系, 研究表明福建省大部县(市)土地利用处于基本可持续利用阶段; 刘军^[8]从社会、生态、经济方面, 构建包括社会资源、土地资源、水资源、生物资源、经济资源的湖南省农业资源可持续利用评价指标体系, 发现水资源对农业资源可持续利用影响较大; 刘双等^[9]从土地利用条件、土地利用结构与程度、土地利用效益和土地可持续利用保障 4 个方面评价土地资源可持续利用, 认为南宁市处于可持续利用发展阶段; 郭艳荣等^[10]将四川省农业资源评价体系分为土地资源、水资源、生物资源、环境资源、经济资源及社会资源等方面; 张杰等^[11]从水资源条件系统、社会系统、经济系统及生态环境系统等方面, 研究广西省水资源的可持续利用情况; 钟锦玲等^[12]从“经济-社会-生态”角度, 构建包括土地社会环境、土地经济效益、土地生态保障 3 个方面的广西土地资源可持续利用评价指标体系, 结果表明广西土地资源可持续利用水平在波动中上升。此外, 刘秀雨等^[13]运用生态足迹模型分析了甘肃省耕地资源的可持续利用问题;

收稿日期: 2022-04-22 修回日期: 2023-02-09 网络出版日期: 2023-05-05
基金项目: 厦门理工学院高层次人才科研项目(YSK22025R)
作者简介: 王辰璇(1992-), 女, 博士, 主要研究方向为农业资源与环境管理。E-mail: wangcx133@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

刘夏等^[14]、陈南祥等^[15]分别运用系统动力学方法对塔里木河流域资源利用、河南省水资源可持续利用进行评价；雷宏军等^[16]运用模糊评价对郑州市水资源可持续利用进行分析。

农业资源可持续利用指标体系主要涵盖经济、社会、生态三大方面，较多关注水资源可持续，目前农业资源可持续利用指标体系还需要进一步完善。在农业资源可持续利用评价建模中，随着影响因素的增加，评价模型的空间维数也会增加，人工智能的引入为农业资源的可持续利用评价提供了新思路。支持向量机（Support Vector Machine, SVM）对样本要求不高，也没有模型选择、维数灾难和局部极小等不足，在解决高维问题方面优势明显。然而，当样本数据量较大时，SVM 的计算速度会变慢，为此，专家学者提出采用人工智能优化 SVM 参数，提高 SVM 性能。SVM、智能优化 SVM 已得到较好应用。任永泰等^[17]运用 GA-SVM 模型对水资源可持续利用进行评价；季敏等^[18]运用 SVM 对渔业资源可持续利用分析；卢敏等^[19]采用 SVM 对水资源可持续利用评价；王亚云等^[20]将 PSOSVM 模型应用于土地资源的适宜性评价；聂笃宪等^[21]采用 PSO 优化 SVM 模型应用于水质资源评价。因此，智能优化 SVM 模型能较好地用于农业资源可持续利用评价。

在采用人工智能优化数据之前，一般都需要先进行数据预处理。农业资源可持续利用指标体系包括经济、科技、社会、生态、自然资源、环境治理的集合，农业资源可持续利用是在不断提高资源的生态效率前提下实现的。提高生态效率是农业资源可持续利用研究的永恒主题，特别是对于那些稀缺资源，如中国的土地资源、旱地的水资源等，提高资源的生态效率愈显意义重大，因此，本文将农业生态效率纳入指标体系。【切入点】从已有学者对农业资源可持续利用研究表明，缺少对原始数据进行降噪预处理，缺少运用人工智能技术针对陕甘宁新的农业资源可持续利用研究。【拟解决的关键问题】为此，本文采用小波分析进行数据降噪预处理，与微粒群算法（Particle Swarm Optimization, PSO）支持向量机结合，对陕甘宁新地区农业资源可持续利用进行评价，为小波-PSOSVM 模型应用于农业资源可持续利用评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区农业资源利用概况

陕西省光照条件较好，但热量与降水匹配失衡，季节性缺水问题严重，夏季 6—8 月降水约占全年总降水量的 50%，光照资源在农业发展上得不到充分发挥^[22]。甘肃省人均耕地占有量是全国人均占有量的 1

倍多，降水分布不均使得甘肃省农业资源在空间上差异明显^[23]，甘肃省旱地与水田的占比约为 99.8：0.2，虽然近些年省内耕地面积有所增长，但旱地比例仍然远高于水田，农作物结构单一、农业现代化水平较低的问题日益突出^[23]。宁夏虽然人均耕地占有量约为 0.189 hm²，土地资源丰富，但南部分布大量丘陵沟壑，水土沙漠化现象严重，生态环境相对脆弱^[24]。中部地区平均年降水量不足 300 mm，土地沙化问题限制了农作物的增长。新疆约占我国陆地总面积的 1/6，但可利用的耕地资源有限。年平均降水量不足 200 mm。塔克拉玛干沙漠占据了南疆的大部分面积，极度干旱的情况下，水资源难以保障农业生产^[25]。

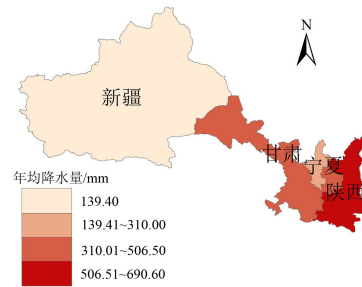


图 1 研究区年均降水量

Fig.1 Average annual precipitation in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 支持向量机

支持向量机（Support Vector Machine, SVM）是基于 VC 维理论和结构的风险最小化理论提出的^[26]。农业资源可持续利用评价问题包含多个评价属性，其中存在着非线性，对给定的训练样本集 $D=\{(x_i, y_i)|x_i \in \mathbb{R}^d, y_i \in \mathbb{R}\}$ ， $i=1, 2, \dots, l$ ，支持向量机将原始变量空间 x 映射到新的高维空间 $\phi(\cdot)$ ，即寻找 ω 和 b ，使得回归函数 $f(x)=\omega^T \phi(x)+b$ 的结构风险最小化，即 $\min \frac{1}{2} \omega^T \omega$ 。支持向量机训练精度与惩罚系数 C 、核函数 g 以及不敏感系数 ϵ 有关，而这 3 个参数与支持向量机本身没有确定关系，常需借助于其他人工智能算法^[27-28]。考虑到微粒群算法具有全局寻优、简单易实现等优势，本文采用 PSO 并与小波变换结合构建小波-粒子群算法支持向量机模型，再与未经小波变换的结果进行对比。

1.2.2 小波-PSOSVM 实现步骤

1) 粒子群算法原理

粒子群优化是一种群体演化算法，把它想象成一个在 D 维最优搜索空间中，无体积的粒子，各个微粒的位置、速度和适应值均不同，每次迭代的过程都有迹可循，若找到一个更好的解决方案，它将被视为找到下一个解决方案的基础。该方法效率高、鲁棒性强。初始化微粒群，迭代寻求最优解，微粒在追随个体极值 $pbest$ 和全局极值 $gbest$ 的过程中不断更新。直至寻找到这 2 个最优值，微粒依据以下计算式更新其速度和

位置。

PSO中任一微粒 i 的速度:

$$V_i = WV_{i-1} + c_1 \text{Rand}() (P_i - X_i) + c_2 \text{Rand}() (P_j - X_i) \quad (1)$$

微粒群中任一微粒 i 的位置:

$$X_i = X_{i-1} + V_i \quad (2)$$

式中: V_i 是粒子 i 的速度; X_i 是粒子 i 的位置; P_i 代表 p_{best} ; P_j 代表 g_{best} ; 惯性权重用 W 表示; c_1 、 c_2 为加速度常数; Rand 为 $(0, 1)$ 区间的随机数^[29]。

2) 小波-粒子群优化支持向量机的步骤

①对经过筛选后确立的指标体系进行小波变换:

将筛选后农业资源可持续利用评价指标, 进行一维离散平稳小波分析, 进行数据预处理。②将小波变换后的农业资源可持续利用评价数据种群初始化, 设定初始参数 C 及 g 、微粒群规模、微粒开始位置和速度、最大迭代数和精度要求等。③初始化后, 利用每个参数的初始值对训练集进行训练, 构造回归模型。④对训练集进行训练, 计算各微粒的适应度值 $F(X_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (f_j - y_j)^2$ 。⑤比较各微粒当前的适应度值 $F(X_i)$ 与微粒最佳适应度值 $F(P_{pbest})$, 如果 $F(X_i) < F(P_{pbest})$, 则 $F(P_{pbest}) = F(X_i)$, 当前位置为粒子的最佳位置。⑥比较各粒子最佳位置的适应值 $F(P_{pbest})$ 和所有微粒最佳位

置的适应值 $F(P_{gbest})$, 若 $F(P_{pbest}) > F(P_{gbest})$, 则 $F(P_{gbest}) = F(P_{pbest})$, 设置调整的位置为所有微粒的最佳位置。⑦调整微粒速度和位置, 得到 SVM 优化参数。

⑧确定所有微粒最佳位置的适应值或迭代次数是否满足要求, 如果是, 则计算完成, 并保留对应于当前微粒群的总体最优位置值; 如果不是, 则返回到③并继续。⑨将获得的最佳参数应用于支持向量机模型, 并将训练好的模型测试应用于测试集。

2 结果与分析

2.1 陕甘宁新地区农业资源可持续利用评价指标体系建立

对遴选的 2017—2019 年的辽、京、津、沪、冀、鲁、苏、浙、闽、粤、桂、琼、陕、甘、宁、青、新、川、云、贵、藏、渝、黑、吉、晋、蒙、皖、豫、鄂、湘、赣共 31 个省份的 150 个备选指标进行显著性与相关性分析, 本文借鉴前人^[30-31]的经验, 依据科学性、可比性原则初步构建 150 个备选指标, 对相关系数大于 0.7 的指标进行合并, 最后建立包含经济、科技、社会与生活、自然环境、资源、生态治理 6 个子系统 62 个具体指标的农业资源可持续利用指标体系(表 1)。

表 1 农业资源可持续利用指标体系

Table 1 Index system of sustainable utilization of agricultural resources

准则层	指标层	准则层	指标层
经济子系统	农村居民人均可支配收入 $X1/(\text{元} \cdot \text{人}^{-1})$	自然环境子系统	国家级自然保护区个数 $X30/\text{个}$
	农村居民人均消费支出 $X2/(\text{元} \cdot \text{人}^{-1})$		沙化耕地 $X31/\text{hm}^2$
	城乡居民收入比 $X3/\text{倍}$		森林覆盖率 $X32/\%$
	人均社会消费品零售总额 $X4/\text{亿元}$		洪涝灾成灾面积 $X33/\times 10^3 \text{hm}^2$
	单位面积作物产量 $X5/(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$		风雹灾成灾面积 $X34/\times 10^3 \text{hm}^2$
	农村贫困人口(2010 年标准) $X6/\text{万人}$		冷冻灾成灾面积 $X35/\times 10^3 \text{hm}^2$
	人均耕地面积 $X7/\text{亿元}$		台风灾成灾面积 $X36/\times 10^3 \text{hm}^2$
	第一产业增加值占地区生产总值比重 $X8/\%$		草原鼠害危害面积 $X37/\times 10^3 \text{hm}^2$
	农业结构调整减少耕地面积 $X9/\text{hm}^2$		草原火灾受害面积 $X38/\text{hm}^2$
			森林火灾受害森林面积 $X39/\text{hm}^2$
科技子系统	农业机械化水平 $X10/(\times 10 \text{kW} \cdot \text{hm}^{-2})$	资源子系统	地质灾害数 $X40/\text{处}$
	农村居民年末计算机拥有量 $X11/(\text{台} \cdot \text{百户}^{-1})$		地震灾害次数 $X41/\text{次}$
	国家农业科技园区数 $X12/\text{个}$		农业生态效率 $X42/\%$
	国家现代农业产业园数 $X13/\text{个}$		耕地占农用地比例 $X43/\%$
	农业科技投入 $X14/\text{亿元}$		园地占农用地比例 $X44/\%$
	农业农村信息化示范基地个数 $X15/\text{个}$		林地占农用地比例 $X45/\%$
	国家农业科学观测实验站个数 $X16/\text{个}$		草地占农用地比例 $X46/\%$
	数字农业农村发展水平评价先进县个数 $X17/\text{个}$		农用塑料薄膜使用量 $X47/\times 10^3 \text{kg}$
	数字农业农村发展水平评价创新项目数 $X18/\text{个}$		农用柴油使用量 $X48/\times 10^7 \text{kg}$
	种业骨干企业个数 $X19/\text{个}$		农药使用量 $X49/\times 10^3 \text{kg}$
社会与生活子系统	国有企事业单位农业技术人员 $X20/\text{人}$	生态治理子系统	种子储备量 $X50/\times 10^4 \text{kg}$
	乡村大专及以上学历受教育百分比 $X21/\%$		水田占耕地比例 $X51/\%$
			退耕地造林面积 $X52/\text{hm}^2$
	行政村公路通畅率 $X22/\%$		建设占用减少耕地面积 $X53/\text{hm}^2$
	装机容量 $X23/\times 10^4 \text{kW}$		灾毁耕地 $X54/\text{hm}^2$
	村卫生室 $X24/\text{个}$		生态退耕 $X55/\text{hm}^2$
	设卫生室的村数占行政村数比重 $X25/\%$		矿业开采累计占用损坏土地 $X56/\text{hm}^2$
	乡镇文化站 $X26/\text{个}$		本年矿山恢复面积 $X57/\text{hm}^2$
	水库库容量 $X27/\times 10^8 \text{kg}^3$		保护耕地 $X58/\times 10^3 \text{hm}^2$
	无害化卫生厕所普及率 $X28/\%$		人工造林面积 $X59/\times 10^3 \text{hm}^2$
	太阳能热水器 $X29/\times 10^4 \text{km}^2$		飞播造林面积 $X60/\times 10^3 \text{hm}^2$
			当年新封山(沙)育林面积 $X61/\times 10^3 \text{hm}^2$
			人工造林更新面积 $X62/\times 10^3 \text{hm}^2$

其中,农村居民人均可支配收入、城乡居民收入比、农村居民人均消费支出、人均社会消费品零售总额、单位面积作物产量、装机容量、村卫生室、设卫生室的村数占行政村数比例、乡镇文化站、水库库容量、太阳能热水器、国家级自然保护区个数、耕地占农用地比例、园地占农用地比例、林地占农用地比例、草地占农用地比例、农用塑料薄膜使用量、农用柴油使用量、农药使用量、水田占耕地比例、第一产业增加值占地区生产总值比例、洪涝灾成灾面积、风雹灾成灾面积、冷冻灾成灾面积、台风灾成灾面积、人工造林面积、飞播造林面积、当年新封山(沙)育林面积和人工造林更新面积均来自于 2018—2020 年《中国农村统计年鉴》计算得到。人均耕地面积、农业结构调整减少耕地面积、无害化卫生厕所普及率、沙化耕地、森林覆盖率、草原鼠害危害面积、草原火灾受害面积、森林火灾受灾森林面积、地质灾害数、退耕地造林面积、建设占用减少耕地面积、灾毁耕地、生态退耕、矿业开采累计占用损坏土地和本年矿山恢复面积均来自 2018—2020 年《中国环境统计年鉴》计算得到。农村贫困人口(2010 年标准)、农村居民年末计算机拥有量数据来源于 2018—2020 年《中国住户调查年鉴》;农业机械化水平、地震灾害次数来源于 2018—2020 年《中国统计年鉴》;公有企事业单位农业技术人员数据来源于 2018—2020 年《中国人口和就业统计年鉴》,乡村大专及以上受教育百分比根据《中国人口和就业统计年鉴》的数据计算得到;行政村公路通畅率数据来自 2018—2020 年《中国交通年鉴》;保护耕地来自 2018—2020 年《中国水利统计年鉴》。农业科技投入的数据参考吕屹云等^[32]的研究,使用《中国科技统计年鉴》省(自治区、直辖市)科研费用支出的 7%作为农业科技投入的变通量。国家农业科技园区、国家现代农业产业园、农业农村信息化示范基地个数、国家农业科学观测实验站个数、数字农业农村发展水平评价先进县个数、数字农业农村发展水平评价创新项目数分别根据科技部公示的第六、第七、第八批国家农业科技园区、农业农村部发布的国家现代农业产业园创建名单、农业农村部关于认定全国农业农村信息化示范基地名单、农业农村部办公厅关于确定国家农业科学观测实验站名单、农业农村部信息中心《关于全国县域数字农业农村发展水平评价先进县及创新项目和优秀组织奖单位的通报》整理得出。种业骨干企业个数由中国种子协会网、中国种子协会关于中国种业信用骨干企业和中国蔬菜种业信用骨干企业认定结果、中国种子行业信用评价结果整理出。种子储备量数据来源于 CnOpenData 中国种子储备数据,以及中国种业大数

据平台。农业生态效率采用超效率 SBM (super-efficiency slack based measure) 模型测算请见参考文献[33]得出。

2.2 基于小波-PSOSVM 的陕甘宁新地区资源可持续利用评价综合分析

进行小波-PSOSVM 和小波-SVM 的陕甘宁新地区资源可持续利用评价,并与未经小波预处理的模型对比,结果见表 2、表 3。

表 2 基于小波-PSOSVM、PSOSVM 资源可持续利用评估结果

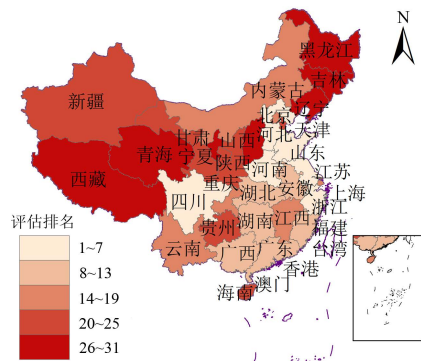
省区	实际排名	小波-PSOSVM 预测结果	小波-PSOSVM 预测排名	PSOSVM 预测结果	PSOSVM 预测排名
北京	14	0.064 2	13	0.064 2	13
天津	21	-0.043 2	21	-0.048 5	21
河北	5	0.149 6	6	0.149 6	6
山西	26	-0.115 6	26	-0.115 5	27
内蒙古	18	0	18	0.000 2	18
辽宁	30	-0.233 2	30	-0.052 9	22
吉林	25	-0.087 7	25	-0.087 7	26
黑龙江	29	-0.158 8	29	-0.158 8	30
上海	17	0.012 3	17	0.008 8	17
江苏	2	0.23	2	0.229 9	2
浙江	6	0.132 3	7	0.132 3	7
安徽	9	0.104 2	10	0.101 8	10
福建	11	0.096 7	11	0.091 6	11
江西	15	0.056 4	15	0.055 7	15
山东	1	0.271 7	1	0.271 8	1
河南	4	0.156	4	0.151 7	5
湖北	10	0.114	9	0.114 2	9
湖南	7	0.152 1	5	0.152 1	4
广东	8	0.114 5	8	0.114 6	8
广西	12	0.081	12	0.078 8	12
海南	19	-0.025 6	19	-0.025 6	19
重庆	13	0.063 3	14	0.063 3	14
四川	3	0.162 8	3	0.162 8	3
贵州	23	-0.057 3	23	-0.057 2	25
云南	16	0.027 6	16	0.027 5	16
西藏	31	-0.256 8	31	-0.256 8	31
陕西	24	-0.055 6	22	-0.055 4	23
甘肃	22	-0.06	24	-0.055 5	24
青海	28	-0.130 1	28	-0.130 1	29
宁夏	27	-0.125 5	27	-0.125 4	28
新疆	20	-0.036 3	20	-0.036 3	20

表 3 运行结果比较

方法	MSE	时间/s	相关系数
PSOSVM	0.015 339	60	0.967 2
小波-PSOSVM	$9.411 5 \times 10^{-5}$	56	0.967 9
小波-SVM	20.835 5	824	0.747 5
SVM	30.903 2	838	0.633 7

表 2 显示我国 31 个主要省区(自治区、直辖市,由于港澳台地区数据缺乏及统计口径差异,本文研究区域不包括港澳台地区)小波-PSOSVM 和 PSOSVM 资源利用可持续评估评价结果。陕甘宁新地区农业资源可持续利用评价在全国排名分别为 20、22、24、27 名,这 4 个省区(自治区)比较,新疆排名第一,甘肃排名第二,陕西排名第三,宁夏排名第四。

由表 3 可知, 小波-PSOSVM 农业资源可持续评价均方误差 MSE 为 9.4115×10^{-5} , 运行时间为 56 s, 相关系数为 0.967 9; 而 PSOSVM 在同样的训练集以及同样的测试集下, 得到的均方误差 MSE 、运行时间、相关系数分别为 0.015 3、60 s、0.967。说明小波处理后, PSOSVM 预测的精度有所提高, 收敛稍加快。小波-SVM 农业资源可持续评价均方误差 MSE 为 20.836, 运行时间为 824 s, 相关系数为 0.748; 而 SVM 在同样的训练集以及同样的测试集下, 均方误差 MSE 、运行时间、相关系数分别为 30.903 2、838 s、0.634, 也同样说明, 小波处理后, SVM 预测的精度提高, 收敛也稍快。



注 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作, 地图无修改。

图 2 资源可持续利用评估排名

Fig.2 Ranking of resources sustainable utilization evaluation

比较小波预处理前后的 PSOSVM 与 SVM, 会得到一致的结论: PSOSVM 预测的精度提高较多, 收敛也快得多。综上所述, 指标数据经小波分析后, 训练模型的复杂度降低了, 小波-PSOSVM 的训练速度也随之加快, 并且预测结果较满意, 小波-PSOSVM 模型是比较科学的。

PSOSVM 的 MSE 比 SVM 的 MSE 显著降低的原因是: 支持向量机训练精度与惩罚因子、核函数参数及不敏感系数有关, 而这 3 个参数与 SVM 本身没有的确定关系, 常借助于其他人工智能算法。PSO 是一种基于群体进化的随机全局优化算法, 它的搜索始终遍及整个解空间而又不依赖梯度信息, 搜索效率高, 具有很强的鲁棒性。该方法从种群随机初始化出发, 对种群内的个体计算适应值、种群根据适应值进行复制, 通过迭代寻找最优解; 整个搜索更新过程是跟随当前最优解的过程, 它通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。在大多数的情况下, 所有的粒子可能更快的收敛于最优解。本文通过 PSOSVM 参数, 提高了训练的精度。

为进一步研究影响陕甘宁新农业资源可持续利用水平的敏感指标, 通过灰色关联分析, 得出各因素与农业资源可持续利用水平的灰色关联度。其中, 灰

色关联度前 5 名的分别为人工造林更新面积、耕地占农用地比例、农村居民年末计算机拥有量、本年矿山恢复面积、无害化卫生厕所普及率, 灰色关联度依次为 0.882 5、0.874 9、0.869 0、0.864 5、0.857 9, 属于生态治理、资源、科技、社会与生活 4 个子系统, 说明这些因素与农业资源可持续利用水平关联度较高, 其中人工造林更新面积和耕地占农用地比例可能与陕甘宁新农业资源可持续利用水平关系关联较为密切。

3 讨论

陕西省单位面积作物产量 $47\ 132.54\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 排名 27; 农业机械化水平 $5.6\ \text{kW}/\text{hm}^2$, 排名 17; 行政村公路畅通率 97.23%, 排名 25; 森林覆盖率 41.43%, 排名 10; 农业生态效率 15.16%, 排名 17; 种子储备量 $119.5\ \text{万 kg}$, 排名 17; 保护耕地 $606.5 \times 10^3\ \text{hm}^2$, 排名 17。综合分析, 陕西省农业资源可持续利用评价结果排名 24。

甘肃省单位面积作物产量 $96\ 588.75\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 排名 7; 农业机械化水平 $5.5\ \text{kW}/\text{hm}^2$, 排名 19; 行政村公路畅通率 90.77%, 排名 30; 森林覆盖率 11.28%, 排名 27; 农业生态效率 3.84%, 排名 28; 种子储备量 $130\ \text{万 kg}$, 排名 15; 保护耕地面积 $496.5 \times 10^3\ \text{hm}^2$, 排名 20。综合分析, 甘肃省农业资源可持续利用评价结果排名 22。

宁夏回族自治区单位面积作物产量 $54\ 732.17\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 排名 26; 农业机械化水平 $5.4\ \text{kW}/\text{hm}^2$, 排名 21; 行政村公路畅通率 99.19%, 排名 23; 森林覆盖率 11.89%, 排名 26; 农业生态效率 11.71%, 排名 18; 种子储备量 $80\ \text{万 kg}$, 排名 21; 保护耕地面积 $194 \times 10^3\ \text{hm}^2$, 排名 26。综合分析, 宁夏农业资源可持续利用评价结果排名 27。

新疆维吾尔自治区单位面积作物产量 $121\ 777.96\ \text{kg}/\text{hm}^2$, 排名第 1; 农业机械化水平 $4.5\ \text{kW}/\text{hm}^2$, 排名 23; 行政村公路畅通率 97.63%, 排名 24; 森林覆盖率 4.24%, 排名 31; 农业生态效率 2.91%, 排名 29; 种子储备量 $60\ \text{万 kg}$, 排名 23; 保护耕地面积 $2\ 591.5 \times 10^3\ \text{hm}^2$, 排名 8。综合分析, 新疆农业资源可持续利用评价排名 20。

综上所述, 新疆的农业资源可持续利用水平在陕甘宁新地区处于领先地位, 宁夏的农业资源可持续利用水平整体偏低。从单位面积作物产量分析, 新疆位列全国第 1, 甘肃居第 7, 陕西和宁夏均位于 20 名之后; 从森林覆盖率、农业生态效率和农业机械化水平分析, 在陕甘宁新地区中, 陕西最优; 从种子储备量分析, 甘肃最优, 陕西次之; 从行政村公路畅通率分析, 宁夏最优, 新疆次之, 陕甘整体排名较低。

陕甘宁新农业资源可持续利用评价与王海燕^[34]研究对比, 王海燕^[34]对 30 个省农业资源可持续利用进行分析, 从环境水平指数看, 新疆优于陕西、甘肃、宁夏; 从区域生态水平指数看, 陕西、甘肃、宁夏均较低, 新疆稍微优于陕西、甘肃、宁夏区域生态水平指数; 从区域抗逆水平指数看, 宁夏、新疆的抗逆能力稍劣于陕西、甘肃。从环境水平指数、生态水平指数、抗逆水平指数分析, 新疆的农业资源可持续利用略优于陕西、甘肃、宁夏, 宁夏农业资源可持续利用水平处于相对较弱。本文的实证分析结果和王海燕^[34]分析基本吻合。本研究与罗其友等^[35]的研究结果一致, 罗其友等^[35]认为, 2000—2013 年山东农业环境可持续、四川农业生态可持续性发展较好, 江苏农业环境可持续性、生态可持续性也较好, 西藏、黑龙江在这 2 个方面有待发展, 辽宁农业环境可持续性有待提升。

通过对陕甘宁新农业资源可持续利用数据进行小波分析数据预处理, 达到对数据降噪目的, 以帮助 PSOSVM 模型做出更准确的判断, 从而提高预测的精度, 将 31 个省区放在一个尺度上比较, 找出陕甘宁新农业资源可持续利用在全国的排位, 按照前文综述, 经济资源、社会资源、生态资源、环境资源、自然资源都是常考虑的, 在自然资源中, 耕地、水、生物、气候这些资源都是常考虑的, 因此指标体系对不同地区相关研究具有参考性。由于研究数据有限, 目前仍在省域进行分析, 下一步将把模型扩大研究范围, 争取可以应用到县域农业可持续资源利用中, 推动农业可持续发展。

4 结 论

1) 与未经过小波分析数据预处理的 PSOSVM 模型进行比较, 本文的小波-PSOSVM 模型预测精度高, 实现简单; 小波-PSOSVM 模型与小波-SVM 模型比较, 前者模型更优, 因此, 小波-PSOSVM 模型适合应用于农业资源可持续利用评价。

2) 指标体系基本可以真实反映我国 31 个主要省(区)的农业资源可持续利用状况, 增强度量的准确性, 指标统计口径要求一致, 使比较分析具有现实指导意义。所以, 南方省份的指标是具有参考性的。

3) 不同气候区的指标也是具有参考性的。在自然环境子系统中风雹灾成灾面积、冷冻灾成灾面积、台风灾成灾面积、灾毁耕地等都体现气候资源, 水库库容量、沙化耕地、森林覆盖率、水田占耕地比例体现水资源。所以, 指标体系对不同气候区的指标有参考性。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

[1] 罗其友, 唐华俊, 陈尔东, 等. 农业基本资源可持续利用区域战略[J].

中国软科学, 1999(3): 114-116.

LUO Qiyu, TANG Huajun, CHEN Erdong, et al. Regional strategy for the sustainable use of basic agricultural resources[J]. China Soft Science, 1999(3): 114-116.

[2] 叶得明, 杨婕妤. 石羊河流域农业经济和生态环境协调发展研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 76-83.

YE Deming, YANG Jieyu. Coordinated development between agricultural economy and ecological environment in Shiyang River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 76-83.

[3] 白晶, 延军平. “亚洲大陆地理中心”生态与经济互动发展模式初探[J]. 干旱区地理, 2010, 33(5): 809-816.

BAI Jing, YAN Junping. Interaction development mode between ecology and economy in Continental Centre of Asia[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(5): 809-816.

[4] 丁金梅, 文琦. 陕北农牧交错区生态环境与经济协调发展评价[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 136-143.

DING Jinmei, WEN Qi. Evaluation of coordination development between ecology and economy in agro-pastoral ecotone of Northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(1): 136-143.

[5] 侯智慧, 逢焕成. 中国北方农牧交错带农业资源可持续利用水平演变及趋势预测: 以乌兰察布市为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(4): 49-55.

HOU Zhihui, PANG Huancheng. Evolution and forecast of sustainable utilization level of agricultural resources in farming pastoral zone of Northern China: a case study of Wulanchabu City[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(4): 49-55.

[6] 侯佳, 赵静, 刘亚. 基于乡村振兴的河北省农业资源可持续利用评价[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(3): 243-251.

HOU Jia, ZHAO Jing, LIU Ya. Evaluation of sustainable utilization of agricultural resources in Hebei based on rural revitalization[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(3): 243-251.

[7] 陈家金, 李丽纯, 李文. 福建省农业资源可持续利用综合评估方法研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1 234-1 238.

CHEN Jiajin, LI Lichun, LI Wen. Comprehensive evaluation method for sustainable utilization of agricultural resources in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(5): 1 234-1 238.

[8] 刘军. 湖南省农业资源利用综合评价研究[J]. 中国人口资源与环境, 2012, 22(6): 96-102.

LIU Jun. Evaluation study on agricultural resources utilization in Hunan Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(6): 96-102.

[9] 刘双, 胡动刚. 北部湾土地资源可持续利用评价研究[J]. 农业技术经济, 2013(11): 57-63.

LIU Shuang, HU Donggang. Evaluation of sustainable use of land resources in Beibu Gulf[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2013(11): 57-63.

[10] 郭艳荣, 张俊伟, 李莉萍. 四川省农业资源可持续利用评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(3): 166-171.

GUO Yanrong, ZHANG Junwei, LI Liping. Research on the sustainable utilization of agricultural resources in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(3): 166-171.

[11] 张杰, 邓晓军, 邹婷婷, 等. 基于虚拟水的广西农业产业结构优化[J]. 节水灌溉, 2017(7): 61-65.

ZHANG Jie, DENG Xiaojun, ZOU Tingting, et al. Agricultural industrial structure optimization based on virtual water in Guangxi[J]. Water Saving Irrigation, 2017(7): 61-65.

[12] 钟锦玲, 周兴, 李文辉. 广西高质量发展与土地资源可持续利用的耦合协调性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 247-257.

ZHONG Jinling, ZHOU Xing, LI Wenhui. Coupling and coordination

- between high quality development and sustainable land resource utilization in Guangxi Zhuang autonomous region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 247-257.
- [13] 刘秀丽, 张勃, 咎国江, 等. 基于生态足迹的甘肃省耕地资源可持续利用与情景预测[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 84-91.
LIU Xiuli, ZHANG Bo, ZAN Guojia, et al. Sustainable use and scenario prediction of cultivated land in Gansu Province based on ecological footprint theory[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1): 84-91.
- [14] 刘夏, 张曼, 徐建华, 等. 基于系统动力学模型的塔里木河流域水资源承载力研究[J]. *干旱区地理*, 2021(5): 1 407-1 416.
LIU Xia, ZHANG Man, XU Jianhua, et al. Water resources carrying capacity of Tarim River Basin based on system dynamics model[J]. *Arid Land Geography*, 2021(5): 1 407-1 416.
- [15] 陈南祥, 王延辉. 基于系统动力学的河南省水资源可持续利用研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 34-37, 51.
CHEN Nanxiang, WANG Yanhui. The water resource sustainable utilization of Henan Province based on system dynamics[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(4): 34-37, 51.
- [16] 雷宏军, 刘鑫, 陈豪, 等. 郑州市水环境承载力研究[J]. *中国农村水利水电*, 2008(7): 15-19.
LEI Hongjun, LIU Xin, CHEN Hao, et al. Research on the carrying capacity of water environment in Zhengzhou City[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(7): 15-19.
- [17] 任永泰, 马雪倩, 张贵杰. 基于 GA-SVM 的水资源可持续利用评价[J]. *数学的实践与认识*, 2013, 43(3): 149-155.
REN Yongtai, MA Xueqian, ZHANG Guijie. Evaluation of water resources sustainable utilization based on GA-SVM[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2013, 43(3): 149-155.
- [18] 季敏, 朱云. 基于支持向量机的渔业资源可持续利用预警方法研究[J]. *中国渔业经济*, 2008, 26(2): 12-15.
JI Min, ZHU Yun. A way on the early-warning of sustainable use of fisheries resources based on Support Vector Machine[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2008, 26(2): 12-15.
- [19] 卢敏, 张展羽. 基于支持向量机的水资源可持续利用评价[J]. *水电能源科学*, 2005, 23(5): 18-21, 4.
LU Min, ZHANG Zhanyu. On assessment of sustainable development level of regional water resource based on support-vector-machine[J]. *Hydroelectric Energy*, 2005, 23(5): 18-21, 4.
- [20] 王亚云, 赵艳玲, 何厅厅, 等. 基于 PSO-SVM 模型的土壤适宜性评价[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(9): 49-53.
WANG Yayun, ZHAO Yanling, HE Tingting, et al. Soil suitability evaluation based on PSO-SVM model[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(9): 49-53.
- [21] 聂笃宪, 魏伟康, 庄泽鸿, 等. 基于 PSO 和 GA 混合优化 SVM 的水质评价[J]. *水科学与工程学报*, 2019(3): 1-4.
NIE Duxian, WEI Weikang, ZHUANG Zehong, et al. Water quality evaluation based on SVM optimized by the HPSOCS combined PSO and GA[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2019(3): 1-4.
- [22] 周丹, 张勃, 张春玲, 等. 陕西省 2001—2010 年土地资源利用效益评价[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 240-244, 249.
ZHOU Dan, ZHANG Bo, ZHANG Chunling, et al. Benefit evaluation of land resource utilization in Shaanxi Province from 2001 to 2010[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(2): 240-244, 249.
- [23] 尚正永. 干旱地区土地资源可持续利用空间差异的评价: 以甘肃省为例[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(1): 149-154.
SHANG Zhengyong. Evaluation on spatial differentia of sustainable use of land resources in arid and semiarid regions: A case in Gansu Province[J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(1): 149-154.
- [24] 宋永永, 米文宝, 仲俊涛, 等. 宁夏耕地集约利用的时空格局演化[J]. *经济地理*, 2015, 35(9): 172-181.
SONG Yongyong, MI Wenbao, ZHONG Juntao, et al. Evolution of spatial and temporal pattern of intensive use of cultivated land in Ningxia[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(9): 172-181.
- [25] 曹云. “一带一路”背景下新疆农业资源配置效率及优化[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(7): 135-141.
CAO Yun. The efficiency and optimization of agricultural resources allocation in Xinjiang under the background of the Belt and Road[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(7): 135-141.
- [26] 王霞, 董永权, 于巧, 等. 结构化支持向量机研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(17): 24-32.
WANG Xia, DONG Yongquan, YU Qiao, et al. Review of structural support vector machines[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(17): 24-32.
- [27] 陈晓红, 张希, 刘贯春. 基于小波降噪的中小企业成长危机预警[J]. *系统工程*, 2014, 32(5): 117-122.
CHEN Xiaohong, ZHANG Xi, LIU Guanchun. Predicting the growth crisis of SMEs based on wavelet denoised financial data[J]. *Systems Engineering*, 2014, 32(5): 117-122.
- [28] 陈莉. 基于 PCA-GASVM 的晋陕甘宁地区生态环境评价[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1 262-1 269.
CHEN Li. Evaluation of the ecology and environment of Shanxi-Shaanxi-Gansu-Ningxia area based on PCA-GA-SVM[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(6): 1 262-1 269.
- [29] 闫雪, 黄法融, 李倩, 等. 基于生态系统服务和 PSO-SOFM 神经网络的中亚水土热资源匹配分区[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(2): 241-255.
YAN Xue, HUANG Farong, LI Qian, et al. Regionalization of the matching degree of water, soil, and heat resources in Central Asia based on ecosystem services using PSO-SOFM neural network[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(2): 241-255.
- [30] 戴晓春, 周承早, 于爱芝. 湖北农业可持续发展能力及其评价[J]. *中国农村经济*, 2001(2): 59-62.
DAI Xiaochun, ZHOU Chengzao, YU Aizhi. Evaluation of sustainable agricultural development capacity in Hubei[J]. *Chinese Rural Economy*, 2001(2): 59-62.
- [31] 包晓斌. 中国农村资源可持续利用的综合评价[J]. *中国农村观察*, 2000(4): 43-48, 76-81.
BAO Xiaobin. Evaluation Method on the sustainable uses of rural resource in China[J]. *China Rural Survey*, 2000(4): 43-48, 76-81.
- [32] 吕屹云, 蔡晓琳. 农业科技投入、区域经济增长与农民收入关系研究: 以广东省 4 个区域为例[J]. *农业技术经济*, 2020(4): 127-133.
LYU Yiyun, CAI Xiaolin. Research on the relation between Agricultural Science and technology investment, regional economic growth and farmers' income in Guangdong Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(4): 127-133.
- [33] 王辰璇, 姚佐文. 农业科技投入对农业生态效率的空间效应分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(11): 1 952-1 963.
WANG Chenxuan, YAO Zuowen. An analysis of the spatial effect of agricultural science and technology investment on agricultural eco-efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(11): 1 952-1 963.
- [34] 王海燕. 农业资源可持续利用研究——农业资源承载力和可持续性评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
WANG Haiyan. Study on sustainable utilization of agriculture resource: Agriculture resource capacity and assessment of sustainable utilization[D]. Beijing: China Agricultural University, 2002.
- [35] 罗其友, 唐曲, 刘洋, 等. 中国农业可持续发展评价指标体系构建及研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(27): 158-164.
LUO Qiyu, TANG Qu, LIU Yang, et al. Construction of index system evaluating agricultural sustainable development in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(27): 158-164.

Sustainable Agricultural Resource Utilization in Northwestern China Determined Using the Wavelet-PSOSVM

WANG Chenxuan¹, CHEN Li², ZHANG An'an²

(1. School of Economics and Management, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. School of Economics and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: 【Objective】 The initiative of “Western Development” launched by Chinese Government in 1999 had greatly benefited the northwestern provinces in the country including Shaanxi, Gansu, Ningxia and Xinjiang. As ecological systems in these provinces are fragile, rational use of agricultural resources is crucial to their sustainable development. The purpose of this paper is to present a method to help sustainable use of their agricultural resources.

【Method】 The method is based on the wavelet-PSOSVM (particle swarm optimization (PSO) and support vector machine techniques (SVM)). The evaluation indexes are constructed using data measured from 2018 to 2020 in six aspects: economy, science and technology, society, natural environment, resources, and ecological governance.

【Result】 ①The mean square error and the correlation coefficient of the wavelet-PSOSVM are 9.4115×10^{-5} and 0.968, respectively. In contrast, the mean square error and the correlation coefficient of PSOSVM are 0.015 3 and 0.967, respectively, using the same training and test set. The wavelet process improves the predicting accuracy and convergence of the PSOSVM. ②The mean square error and the correlation coefficient of the wavelet-SVM are 20.836 and 0.748 respectively, while the mean square error and correlation coefficient of the SVM are 30.903 and 0.634, respectively, using the same training and test sets. The wavelet process also improves the predicting accuracy and convergence of the SVM. **【Conclusion】** Using wavelet process in both PSOSVM and SVM algorithms significantly improves their prediction accuracy, convergence, and training time efficiency, while reducing their complexity. Its application for evaluating sustainable utilization of agricultural resources in the four provinces in northwestern China indicates that, in terms of sustainability, Xinjiang comes to the top, followed by Gansu, with Shaanxi and Ningxia ranked in third and fourth, respectively.

Key words: wavelet analysis; particle swarm optimization; support vector machine; resource sustainability utilization assessment

责任编辑：白芳芳

(上接第 95 页)

Study on Environmental Quality and Prevention of Soil Salinization in Northern Shandong Plain (North of Yellow River)

ZHANG Hongjun^{1,2}, XU Yan¹, WANG Qiang^{1,2*}, ZHANG Taiping¹,
ZHAO Hui¹, WANG Wei¹, ZHANG Ruihua¹, WANG Kuifeng¹

(1. Shandong Institute of Geological Sciences, Ji'nan 250013, China;

2. Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, Ministry of Natural Resources, Ji'nan 250013, China)

Abstract: 【Objective】 Soil salinity is a common abiotic stress most crops experience during their growth. Understanding its spatiotemporal variation and the underlying reasons is impetus to improve agricultural management. We propose a model in this paper to classify soil salinity and analyze the underlying mechanisms. The model is applied to the North of Yellow River in Northern Shandong Plain. **【Method】** The model is based on the two-level fuzzy comprehensive evaluation method. A comprehensive evaluation index system is constructed using soil environment factors, groundwater environmental factors, and physical geographical factors. It considered eight indexes: proportion of land areas affected by salinized soil, degree of soil salinity, soil salt content, lithology of unsaturated zone, depth of groundwater table, groundwater salinity, evaporation-prescription ratio, and topography and landform. The degree of soil quality was divided into excellent, good, moderate, poor, and very poor grades.

【Result】 The areas of soil classified as very poor, poor, moderate, good and excellent based on soil salinization were 5 277.49 km², 6 564.76 km², 4 383.79 km², 5 995.52 km², and 4 919.29 km², respectively. Based on their genesis and salinization, the salinized soils in the region can be divided to three areas consisting of eight sub-areas.

【Conclusion】 Soil salinity in the North of Yellow River in Northern Shandong Plain varies in its severity and space. The results presented in this paper can aid in improving soil management practices to promote a healthy agricultural and rural economy in the region.

Key words: Northern Shandong Plain; salinization; fuzzy comprehensive evaluation method; environmental quality of soils

责任编辑：白芳芳