

# 黄土高原区复垦村庄土壤肥力评价

——以山西省泽州县西部村为例

刘 畅, 师学义, 张美荣

(中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘 要:**以黄土高原区复垦村庄山西省泽州县西部村为研究区,采集和测定了村庄中不同用地类型的土壤,从土壤的物理、大量养分元素和微量元素 3 方面构建了复垦村庄肥力综合评价体系,并通过将粗糙集理论与综合指数法相结合的方法对复垦前后村庄土壤肥力状况进行了对比分析。结果表明:村庄复垦活动有效提升了区域的土壤肥力,但复垦耕地的土壤肥力与标准耕地之间相比仍然存在一定差距,不同地类的土壤肥力改良程度有所不同,其中旧宅的改良效果最好,菜地的改良效果相对不显著。研究结果可为村庄进一步开展土壤肥力提升改良活动提供一定借鉴。

**关键词:**复垦村庄; 土壤肥力评价; 粗糙集理论; 对比分析

**中图分类号:**S158.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)01-0155-06

## Evaluation of Soil Fertility of Reclaimed Village in the Loess Plateau Area

—A Case Study of Xigao Village, Zezhou County, Shanxi Province

LIU Chang, SHI Xueyi, ZHANG Meirong

(College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** We selected Xigao Village of Zezhou County, Shanxi Province in the Loess Plateau as the research area, collected and measured soil samples according to different types of land in the village and established the soil fertility evaluation index system from perspectives of physical attributes, nutritional attributes and trace elements, and conducted the contrast analysis of soil fertility before and after the reclamation work. The results are as follows. The reclamation activities effectively elevated the soil fertility in the village, but the gap between soil fertility in the reclaimed soil and standard arable land still existed. In addition, the degree of the enhanced soil fertility varied among different types of land, the degree in old residential land was elevated the most, while the degree in vegetable field was not remarkable. The research results could provide some reference for conducting activities to enhance soil fertility in the reclaimed village.

**Keywords:** reclaimed village; soil fertility evaluation; rough set theory; contrast analysis

我国黄土高原区域存在着大量的压煤村庄,大规模的煤炭开采活动引发了诸如土地塌陷、地下水枯竭、生态环境恶化等一系列问题,导致许多村庄土地被废弃。受到区域增减挂钩政策以及生态文明建设的共同要求,土地复垦作为改善区域生态环境的有效手段,已被纳入到采煤区开发活动之中,对煤炭开采造成破坏的土地及时复垦,可以有效改善压煤区域生态环境,恢复土地生产力,对提高采煤区居民的生产生活质量有重要的意义<sup>[1]</sup>。

土壤是农业生产不可或缺的资源,也是人类生产

生活的物质基础,土壤质量的核心之一是土壤生产力。而土壤肥力作为基础,是支持土壤生产能力和环境净化能力的集中体现<sup>[2-3]</sup>。对压煤村庄土地进行复垦,大部分土地将被复垦为耕地,复垦后土壤的肥力决定着土地的生产能力与效益,是检验复垦效果的核心指标之一。因此,对复垦村庄的土壤肥力质量的恢复状况进行跟踪监测,并对复垦前后土壤质量进行评价研究,对复垦区域土壤质量的改良与提升具有一定的现实意义。

国内外学者做过一些关于土壤肥力评价的研究与

探讨。土壤肥力评价指标由单一的土壤养分指标发展到包括土壤物理性质、土壤化学性质、土壤生物性质以及环境条件等综合性指标<sup>[4-6]</sup>。所选择的评价方法上,主要的数学方法有特尔斐法、层次分析法、判断矩阵法、熵值法、粗糙集理论、神经网络法、相关系数法以及离差最大化法等。此外,将 GIS 技术用于土壤肥力评价是一个新的研究趋势,崔潇潇等<sup>[7]</sup>利用模糊综合评价法对区域的土壤肥力总体状况进行了一个客观评价,在此基础上利用 GIS 技术分析了土壤肥力空间变异特征。结合已有研究,发现对于黄土高原区压煤村庄土地复垦后土壤肥力的评价研究较少,且在以往关于土壤肥力评价的研究中,对于指标的不确定性考虑较少,因此本文拟通过利用粗糙集理论,对黄土高原区压煤村庄复垦前后土壤肥力评价进行研究。

基于此,本研究选取山西省泽州县西部村为研究区域,选取复垦前后土壤的理化性质变化特征进行研究,揭示复垦区域土壤肥力质量的空间变化规律,建立压煤村庄复垦区域土壤肥力质量的评价模型,为压煤村庄复垦后土壤肥力恢复与改良,土地的可持续发展利用提供一定的借鉴和依据。

## 1 研究区概况

研究区位于山西省泽州县巴公镇的西部村,位于东经 112°51′38″—112°52′09″,北纬 35°40′01″—35°40′39″。土壤属于红黄土质褐土性土壤,黏粒含量整体分布比较均匀一致。受人为活动的干扰,土壤较为紧实,容重较大,通气性差,不利于养分调节和植物根系伸展,很难为植物生长提供良好环境;土壤中有机质等养分含量总体较低,分布较不均匀,难以为作物生长提供足够的养分。而后对该区域进行复垦,采用工程、生物、化学等措施手段对村庄土地进行复垦,以期来增加区域的有效耕地面积和提高区域土地质量。

## 2 研究方法

### 2.1 样点的布设与样品采集

科学合理的样点布置是评价土壤肥力的基础。在村庄内部调查过程中,发现村庄内部的土地利用类型大致可以分为旧宅、院落、土路、石子路和菜地 5 种类型,这 5 种利用类型下的土壤肥力状况差异显著。因此,采样点按照不同土地利用类型进行设置。根据 5 种土地类型的面积比例合理分配各类样点个数,其中,旧宅设置样点 7 个,院落设置样点 7 个,土路设置样点 3 个,石子路设置样点 4 个,菜地设置样点 3 个。同时,在村庄外耕地范围内选取 10 个样点作为对照,以各指标的平均值作为评价标准。本研究主要针对

复垦后耕作层土壤肥力进行研究,因此对剖面 0—30 cm 处的土壤进行采样分析。在每个样点划出 1 m×1 m 的网格,在每个网格内用环刀分别采集 4 个样品,用于化验土壤物理性质;在 4 个网格内分别取 0.5 kg 左右的耕作层土壤,混合均匀后装入样品袋;将土壤袋中的样品在实验室进行风干,剔除石块等杂质用玛瑙研钵磨成粉末,以便后续化验分析。具体的采样点设置情况见表 1。

表 1 村庄内样点情况

土地类型	采样深度	地表状况	样点个数	样点编号
旧宅	0—30 cm	老旧房屋	7	S <sub>01</sub> —S <sub>07</sub>
院落	0—30 cm	砖块、砂石、部分花草树木	7	S <sub>08</sub> —S <sub>14</sub>
土路	0—30 cm	压实土壤	3	S <sub>15</sub> —S <sub>17</sub>
石子路	0—30 cm	碎石子	4	S <sub>18</sub> —S <sub>21</sub>
菜地	0—30 cm	蔬菜等作物	3	S <sub>22</sub> —S <sub>24</sub>

### 2.2 样品测定方法

根据本文构建的评价指标体系,选取 11 个指标进行化验分析,根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)和《土壤环境质量标准》(GB15618—1995),并综合考虑实验室条件,对样品各指标进行测定,具体的测定方法详见表 2。

表 2 复垦村庄土壤肥力测定指标及方法

指标名称	测定方法
容重	环刀法
毛管持水量	烘干—称质量法和浸水法
孔隙度	容重换算法
pH 值	酸碱度计
有机质含量	外热重铬酸钾氧化—容量法
全氮含量	硫酸—高氯酸消煮—开式定氮仪蒸馏滴定法
速效磷含量	碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法
速效钾含量	中性乙酸按提取—火焰光度计法
硼含量	紫外可见分光光度法
重金属铜和锌含量	电感耦合等离子体发射光谱法

### 2.3 复垦村庄土壤肥力评价方法

选择合适的评价方法是使评价结果的准确性和科学性得到保证的关键。为了减少评价中主观因素对结果的影响,越来越多的数学方法被广泛应用于土壤肥力综合评价中,使得土壤肥力的综合评价趋于标准化和定量化<sup>[8]</sup>。本研究通过参考已有的研究成果<sup>[9-12]</sup>,结合本次研究的实际情况,采用结合粗糙集理论与综合指数评价的方法,构建复垦村庄土壤复垦肥力评价体系。

2.3.1 指标选取 根据稳定性、主导性、可操作性、准确灵敏性和独立性原则,结合研究区实际情况,本研究从土壤的物理、大量元素养分和微量元素三方面因素构建土壤肥力评价指标体系。共分为目标层、准则层和指标层 3 级,其中:目标层用于综合表达土壤

的肥力状况;准则层将土壤肥力状况解析成相互联系、相互制约的 3 大子系统,即物理因子、大量元素养分因子和微量元素因子;指标层为可测、可比且可以获得的量化因素,共计 11 个。

2.3.2 指标权重确定 本研究引入粗糙集理论来确定土壤肥力评价体系中的指标权重,粗糙集理论 RST(Rough sets theory)作为智能信息处理技术的一个新成果,是由波兰 Z. Pawlak 教授率先提出,是

一种对不完整数据进行分析、推理、学习、发现的新方法<sup>[13]</sup>。该方法可以在保持分类能力不变的前提下,通过知识简约和消除冗余信息,实现对知识的压缩和再提炼,合理确定各指标权重<sup>[14-15]</sup>。具体的计算步骤如下:(1) 决策表的构建;(2) 属性值的约简;(3) 指标权重计算。

通过上述步骤进行计算,得出各指标的权重结果详见表 3。

表 3 土壤肥力评价指标体系及指标权重

目标层	准则层	指标层	指标解析	权重	趋向
土壤肥力评价指标体系	物理因子	容重	土壤压实程度	0.1734	逆
		毛管持水量	土壤供水与保水能力	0.1063	正
		孔隙度	土壤通水通气与养分调节能力	0.1323	正
		土壤 pH 值	土壤酸碱环境	0.0892	—
	养分因子	有机质	土壤养分主要来源	0.1212	正
		全氮	土壤氮库水平	0.1004	正
		速效磷	土壤可利用磷元素水平	0.0363	正
		速效钾	土壤可利用钾元素水平	0.0544	正
	微量元素因子	硼元素	土壤硼元素水平	0.1021	正
		铜元素	土壤铜元素水平	0.0423	逆
		锌元素	土壤锌元素水平	0.0421	正

2.3.3 评价标准确定 本文的研究对象是煤炭基地复垦村庄的土壤,而煤炭基地村庄复垦的主要目的是为了增加有效耕地面积,那么复垦的基本要求就是让复垦后的耕地质量水平能够达到周围耕地质量的平均水平。为了使评价过程更加简洁,结果更加直观,

本研究选取复垦村庄周围优质耕地的土壤肥力相关数据作为评价标准。为了使评价标准更加贴切研究区域的实际情况,在耕地范围内选取 10 个样点并测定各指标数值,以各指标的平均值作为评价标准,具体的计算结果详见表 4。

表 4 评价指标标准值

耕地样点	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	毛管 持水量/%	孔隙 度/%	土壤 pH 值	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	硼元素/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	铜元素/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	锌元素/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
G <sub>01</sub>	1.51	30.84	51.27	7.00	37.17	2.41	12.05	115.24	68.54	39.04	53.24
G <sub>02</sub>	1.47	31.26	47.84	7.20	36.03	2.35	12.21	120.16	71.23	37.81	55.26
G <sub>03</sub>	1.46	29.84	47.48	7.20	35.45	2.37	11.91	105.23	70.35	37.45	58.27
G <sub>04</sub>	1.52	28.67	52.91	7.10	34.87	2.14	12.02	115.64	68.04	38.11	50.46
G <sub>05</sub>	1.44	32.77	50.21	7.00	35.32	2.29	11.87	102.35	70.32	40.34	55.24
G <sub>06</sub>	1.46	28.17	47.92	7.30	35.65	2.41	12.04	106.26	69.44	38.32	54.35
G <sub>07</sub>	1.53	34.21	48.86	7.10	36.07	2.26	11.84	115.32	71.04	37.94	50.65
G <sub>08</sub>	1.52	30.94	49.12	6.90	35.74	2.45	11.97	109.21	70.35	38.29	57.98
G <sub>09</sub>	1.50	29.12	50.14	7.20	38.56	2.37	11.88	108.63	69.54	36.21	53.26
G <sub>10</sub>	1.49	32.92	52.94	7.10	34.95	2.33	12.03	108.32	72.34	37.69	53.01
平均值	1.49	30.87	49.87	7.11	35.98	2.34	11.98	110.64	70.12	38.12	54.17

2.3.4 土壤肥力评价模型的建立

(1) 指标标准化。由于各指标数据存在不同量纲,且取值范围差异较大,需要对指标数据进行标准化处理。通过标准化处理消除所有指标数据量纲,且取值范围在[0,1],使得各指标数据具有可比性,能够进行加权求和运算。

正向指标的标准化计算公式如下:

$$Y_i = \begin{cases} 1 & X_i \geq \overline{X} \\ X_i / \overline{X} & X_i < \overline{X} \end{cases} \quad (1)$$

式中:Y<sub>i</sub> 为正向指标 i 的标准化值;X<sub>i</sub> 为指标 i 的实测值; $\overline{X}$  为指标 i 的标准值。正向指标的实测值越大,土壤肥力状况越好;实测值越小则土壤肥力状况越差。

逆向指标的标准化计算公式如下：

$$Y_i = \begin{cases} \overline{X}/X_i & X_i > \overline{X} \\ 1 & X_i \leq \overline{X} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $Y_i$  为逆向指标  $i$  的标准化值； $X_i$  为指标  $i$  的实测值； $\overline{X}$  为指标  $i$  的标准值。逆向指标的实测值越小，土壤肥力状况越好；实测值越大则土壤肥力状况越差。

土壤 pH 值难以简单地划分为正向指标或负向指标，结合研究区农业生产对耕地需求的实际状况，其标准化公式为：

$$Y_i = \begin{cases} \frac{X_i}{6.0} & X_i < 6.0 \\ 1 & 6.0 \leq X_i \leq 7.5 \\ \frac{7.5}{X_i} & X_i > 7.5 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $Y_i$  为土壤 pH 值的标准化值； $X_i$  为土壤 pH 值的实测值。土壤 pH 值的实测值在  $[6.0, 7.5]$  范围内土壤肥力状况较好，土壤 pH 值偏大或偏小都不利于作物生长发育。

(2) 土壤肥力综合指数计算。根据不同指标的标准化值及通过粗糙集理论方法计算出的权重，通过加权求和可以求得各样点土壤肥力综合指数。

$$M = \sum_{i=1}^n Y_i W_i \quad (4)$$

式中： $M$  为样点的土壤肥力综合指数； $n$  为评价指标个数； $Y_i$  为第  $i$  个评价指标的标准化值； $W_i$  为第  $i$  个指标的权重。

求得各样点土壤肥力综合指数之后，通过计算平均值可得不同利用类型土地综合指数，在此基础上根据不同利用土地的面积比例加权求和得到区域整体的土壤肥力综合指数。

$$N = \sum_{i=1}^k M_i S_i \quad (5)$$

式中： $N$  为复垦村庄的土壤肥力综合指数； $k$  为区域内土地利用类型种类数； $M_i$  为第  $i$  种土地利用类型的土壤肥力综合指数； $S_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积比例。

为了有效地表示复垦前后土壤肥力改良的程度，引入土壤肥力改良系数予以量化表示，计算公式为：

$$IC = \frac{N_2 - N_1}{N_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中： $IC$  是土壤肥力改良系数； $N_1$  是复垦前土壤肥力指数； $N_2$  是复垦后土壤肥力指数。改良系数越大，表明土壤肥力改良效果越好。

3 结果与分析

3.1 不同土地类型土壤肥力改良效果

旧宅在复垦前的村庄范围占有较大比例，复垦前

的土壤肥力综合指数为 0.555 3，复垦为耕地后的土壤肥力综合指数为 0.823 4，改良指数为 48.27%。旧宅在复垦前是人们居住场所，人为活动频繁，踩踏较为严重而导致土壤较为密实，由于房屋遮挡缺少光照，土壤中缺少微生物活动，有机质等营养物质匮乏，导致了土壤肥力较差，通过一定的措施复垦为耕地后，土壤肥力指数有很大提升，改良效果显著，具体的旧宅土壤肥力改良评价结果见表 5。

表 5 旧宅土壤肥力改良评价结果

样点 编号	土地 类型	复垦前土壤 肥力指数	复垦后土壤 肥力指数	改良 指数/%
S <sub>01</sub>	旧宅	0.5625	0.8565	52.27
S <sub>02</sub>	旧宅	0.4987	0.8124	62.90
S <sub>03</sub>	旧宅	0.5798	0.7965	37.37
S <sub>04</sub>	旧宅	0.6032	0.8432	39.79
S <sub>05</sub>	旧宅	0.5468	0.8254	50.95
S <sub>06</sub>	旧宅	0.5265	0.8298	57.61
S <sub>07</sub>	旧宅	0.5698	0.7998	40.37
平均值		0.5553	0.8234	48.27

农村住宅多以房屋和院落合围而成，院落复垦前的土壤肥力综合指数为 0.737 6，复垦为耕地后的土壤肥力综合指数为 0.852 0，改良指数为 15.52%。院落也是人们休息和活动的场所，土壤较为密实，容重较大，但是大部分院落具有良好的光照条件，并且种植了树木、花卉等植物，土壤中有一定的微生物活动，肥力状况总体优于住宅。复垦之后，土壤肥力指数有较大提升，但改良效果差于旧宅，具体的院落土壤肥力改良评价结果见表 6。

表 6 院落土壤肥力改良评价结果

样点 编号	土地 类型	复垦前土壤 肥力指数	复垦后土壤 肥力指数	改良 指数/%
S <sub>08</sub>	院落	0.7012	0.8597	22.60
S <sub>09</sub>	院落	0.7134	0.8745	22.58
S <sub>10</sub>	院落	0.7894	0.8256	4.59
S <sub>11</sub>	院落	0.6987	0.8325	19.15
S <sub>12</sub>	院落	0.7498	0.8398	12.00
S <sub>13</sub>	院落	0.7445	0.8478	13.88
S <sub>14</sub>	院落	0.7659	0.8841	15.43
平均值		0.7376	0.8520	15.52

村庄内部的道路较多都是土路，复垦前的土壤肥力综合指数为 0.646 6，复垦为耕地后的土壤肥力综合指数为 0.840 9，改良指数为 30.04%。土路是人们通行的场所与载体，受到来往交通汽车碾压以及人们日常行走密集踩踏而导致容重较大，植物无法生长，虽然可以接受光照和雨水，但总体来讲土壤营养物质含量低、微生物活动性弱，土壤肥力总体状况差。

复垦为耕地之后,土壤肥力状况有了较为明显改善,具体的土路土壤肥力改良评价结果见表 7。

表 7 土路土壤肥力改良评价结果

样点 编号	土地 类型	复垦前土壤 肥力指数	复垦后土壤 肥力指数	改良 指数/%
S <sub>15</sub>	土路	0.6231	0.8454	35.68
S <sub>16</sub>	土路	0.6454	0.8231	27.53
S <sub>17</sub>	土路	0.6714	0.8541	27.21
平均值		0.6466	0.8409	30.04

村庄中石子路占地面积略多于土路,复垦前的土壤肥力综合指数为 0.600 3,复垦为耕地后的土壤肥力综合指数为 0.823 4,改良指数为 37.14%。和土路较为相似,石子路也是受到严重踩踏而导致土壤容重大,紧实度高,营养物质含量低,微生物活动性弱,土壤肥力总体状况差,并且土壤中含有较多石块,破坏了土壤的质地与结构,不利于土壤储存水分与养分,所以复垦前石子路的土壤肥力状况要差于土路。通过复垦的工艺措施,改善了土壤的组分与结构,土壤肥力状况明显改善,且改良指数要大于土路,具体的石子路土壤肥力改良评价结果见表 8。

表 8 石子路土壤肥力改良评价结果

样点 编号	土地 类型	复垦前土壤 肥力指数	复垦后土壤 肥力指数	改良 指数/%
S <sub>17</sub>	石子路	0.5974	0.8147	36.37
S <sub>18</sub>	石子路	0.6144	0.8321	35.43
S <sub>19</sub>	石子路	0.5879	0.8254	40.40
S <sub>20</sub>	石子路	0.6015	0.8216	36.59
平均值		0.6003	0.8233	37.14

为了方便生活,不少村民在房前屋后的土地上种植了平时食用的蔬菜,菜地占地面积较少,复垦前的土壤肥力综合指数为 0.812 6,复垦为耕地后的土壤肥力综合指数为 0.884 1,改良指数为 8.79%。菜地没有人为踩踏,且长期种植蔬菜,在人为管理和土壤微生物的活动下,其土壤肥力状况已接近耕地水平,所以菜地复垦前后的土壤肥力指数没有显著变化,具体的菜地土壤肥力改良评价结果见表 9 所示。

表 9 菜地土壤肥力改良评价结果

样点 编号	土地 类型	复垦前土壤 肥力指数	复垦后土壤 肥力指数	改良 指数/%
S <sub>22</sub>	菜地	0.8142	0.8914	9.48
S <sub>23</sub>	菜地	0.8021	0.8714	8.64
S <sub>24</sub>	菜地	0.8215	0.8894	8.27
平均值		0.8126	0.8841	8.79

3.2 村庄土壤肥力改良效果

在对村庄内不同土地类型土壤肥力改良效果评价的基础上,通过各地类占地面积比例加权求和即可

得到村庄整体的土壤肥力改良效果。在对不同土地利用类型调查的基础上,结合遥感图像解译,村庄复垦前主要用地类型为旧宅、院落、土路、石子路和菜地,面积比例大致为 30%,35%,10%,15%和 10%。通过公式(4)―(6)计算可知,村庄复垦前土壤肥力指数为 0.660 7,复垦后土壤肥力指数为 0.841 2,改良指数 27.32%,土壤肥力改良效果较为明显,复垦村庄总体复垦前后土壤肥力改良效果详见表 10。

表 10 复垦村庄土壤肥力改良评价结果

项目	复垦前土壤 肥力指数	复垦后土壤 肥力指数	改良 指数/%	面积 比例/%
旧宅	0.5553	0.8234	48.27	30
院落	0.7376	0.8520	15.52	35
土路	0.6466	0.8409	30.04	10
石子路	0.6003	0.8233	37.14	15
菜地	0.8126	0.8841	8.79	10
村庄	0.6607	0.8412	27.32	100

村庄复垦前具有不同的用地类型,各地类的土壤肥力状况差异较大,区域总体的土壤肥力指数介于土路土壤肥力指数与院落土壤肥力指数之间,和优质耕地相比,差距较大,有明显的改良空间。复垦用地类型均为耕地,在人为管理和土壤自我更新的作用下,土壤肥力状况趋于一致,符合实际情况。改良指数为 27.32%,表明了复垦活动使得区域土壤肥力总体状况有了明显改善,为后续的农业种植与生产打下了良好的基础。但是同时可以看出复垦耕地的土壤肥力指数为 0.841 2,与标准耕地相比仍然存在一定差距,需要后续采取针对性的措施,进一步改善土壤肥力状况,提高耕地生产力。

4 结 论

(1) 本研究通过基于粗糙集理论和综合指数评价法相结合的方式,以山西省泽州县复垦村庄西部村为研究区,从物理因子、大量元素养分因子和微量元素因子 3 个方面选取指标综合构建了土壤肥力效果评价指标体系,对复垦前后村庄不同地类的土壤肥力进行了对比分析与研究,研究结果表明了村庄复垦的活动从整体上有效提升了区域的土壤肥力,但复垦耕地的土壤肥力与标准耕地之间相比仍然存在一定差距,另外,不同地类的土壤肥力改良程度有所不同,存在着空间差异性,其中旧宅的改良效果最好,菜地的改良效果相对不显著,需要进一步展开针对性的措施进行改良。

(2) 本次研究将粗糙集理论应用于确定土壤肥力评价各指标的权重当中。粗糙集理论中知识简约与相对正域理论在处理不确定信息与消除冗余信息

等方面具有显著优势,本研究尝试将粗糙集理论引入到复垦土壤肥力评价指标权重中确定的过程中,使得结果更加精确,能够为土壤肥力改良效果研究及相关领域的评价提供一定的理论参考。

(3) 本研究还存在着一些不足与需要改进的地方。由于受到时间和精力限制,在评价体系的构建方面,一些如土壤中微生物含量、土壤质地等对土壤肥力改良有影响的指标并未纳入评价指标体系<sup>[16-17]</sup>,需要后续研究的进一步优化。此外研究的时空跨度需要进一步加大。复垦措施对土壤肥力的改良是一个长期的过程,土壤肥力各项指标的稳定也需要一定的时间。但是由于时间的限制,本文仅对复垦后 1.5 a 的土壤肥力改良效果进行了研究,研究时间稍短。同时,本文仅对农作物生长影响最显著耕作层(0—30 cm)进行了研究,为了得到更加全面详细的结果,可以在后续研究中对土壤肥力进行分层研究。

#### 参考文献:

- [1] 彭建,蒋一军,吴健生,等.我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J].地理科学进展,2005,4(2):38-48.
- [2] 杨炎生,信有诠.中国红黄壤地区农业综合发展与对策[M].北京:中国农业科技出版社,1995.
- [3] 王梅,王力,易小波,等.水蚀风蚀交错区六道沟流域土壤肥力评价[J].西南大学学报:自然科学版,2012,34(5):68-76.
- [4] Nortcliff S. Standardisation of soil quality attributes[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 88(2):161-168.
- [5] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production

systems in Northern California[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002,90(1):25-45.

- [6] 罗忠志,高华端,李圆玥,等.长顺元雷河小流域草地治理模式下土壤肥力评价[J].水土保持研究,2015,22(1):45-50.
- [7] 崔潇潇,高原,吕贻忠.北京市大兴区土壤肥力的空间变异[J].农业工程学报,2010,26(9):327-333.
- [8] 骆伯胜,钟继洪,陈俊坚.土壤肥力数值化综合评价研究[J].土壤,2004,36(1):104-106.
- [9] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等.基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J].生态学杂志,2010,29(1):173-180.
- [10] 叶回春,张世文,黄元仿,等.粗糙集理论在土壤肥力评价指标权重确定中的应用[J].中国农业科学,2014,47(4):701-717.
- [11] 杨奇勇,杨劲松,姚荣江,等.基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J].农业工程学报,2010,26(4):100-105.
- [12] 周勇,张海涛,汪善勤,等.江汉平原后湖地区土壤肥力综合评价方法及其应用[J].水土保持学报,2001,15(4):70-74.
- [13] 孟海波,赵立欣,徐义田,等.用粗糙集理论评价生物质固体成型燃料技术的研究[J].农业工程学报,2008,24(3):198-202.
- [14] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Parallel Programming, 1982,11(5):341-356.
- [15] 周献中,黄兵,李华雄,等.不完备信息系统知识获取的粗糙集理论与方法[M].南京:南京大学出版社,2010.
- [16] 张勇,杜华栋,张振国,等.黄土丘陵区自然植被恢复下土壤微生物学质量演变特征[J].水土保持研究,2014,21(1):7-17.
- [17] 冯晓娟,雷国平,张慧,等.基于 GIS 的前哨农场耕地地力评价[J].水土保持研究,2014,21(1):199-202.

(上接第 154 页)

- [10] 宋丽琼,田原,邬伦,等.日降水量的空间插值方法与应用对比分析:以深圳市为例[J].地球信息科学,2008,10(5):566-572.
- [11] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [12] 邵晓梅,严昌荣,魏红兵.基于 Kriging 插值的黄河流域降水时空分布格局[J].中国农业气象,2006,27(2):65-69.
- [13] 曾怀恩,黄声享.基于 Kriging 方法的空间数据插值研

究[J].测绘工程,2007,16(5):5-8.

- [14] 邓羽,刘盛和,姚峰峰,等.基于协同克里格的基准地价评估及空间结构分析[J].地理科学进展,2010,28(3):403-408.
- [15] 徐天献,王玉宽,傅斌.四川省降水空间分布的插值分析[J].人民长江,2010,41(10):9-12.
- [16] 焦永清,李斌,张坤.基于空间可视化的气温插值方法比较[J].测绘工程,2013,22(5):62-64.