

# 扬黄灌区开垦时间对土壤剖面有机碳含量 和组分变化的影响

杨新国, 曲文杰, 宋乃平, 陈 林, 刘秉儒

(西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

**摘 要:** 基于开垦时间长短和跨度大小, 研究了近 40 a 来宁夏中部扬黄灌区土壤有机碳含量、组分及其化学稳定性的变化规律。结果表明: 代尺度上(15~35 a, 10 a 为最小单位), 随开发年限的延长, 依次以 0—40 cm 土壤活性有机碳垂直分布格局(15 a)、10—20 cm 土壤活性有机碳含量(25 a)、10—40 cm 土壤总有机碳含量(35 a)的显著变化为标志, 灌区土壤有机碳表现出一种渐进式演变格局。在此过程中, 表层 0—10 cm 土壤有机碳含量与组成、0—40 cm 分层土壤有机碳化学稳定性维持不变。年尺度上(0~12 a, 3 a 为最小单位), 耕作层土壤总有机碳、活性有机碳含量在 0~12 a 间表现出先增加后下降的波动变化格局, 而有机碳化学稳定性除第 3 年大幅下降外, 基本保持稳定。就扬黄灌区土壤有机碳的变化格局而言, 其相对快速而不稳定的变化主要体现在较小的年尺度上; 代尺度上土壤总有机碳和活性有机碳含量则以一种相对平缓、渐进的方式不断推进其演变进程, 直到 35 a 左右才开始出现显著增长。而有机碳化学稳定性则表现出与时间尺度无关的不变性。

**关键词:** 土壤有机碳; 活性有机碳; 有机碳化学稳定性; 扬黄灌区; 时间尺度

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0127-05

## Soil Organic Carbon and Its Component Dynamics Following the Development Years of the Pumping-Yellow River Irrigation Area in Ningxia

YANG Xinguo, QU Wenjie, SONG Naiping, CHEN Lin, LIU Bingru

(State key Laboratory Breeding Base of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** We investigated the dynamics on two time scales of soil organic carbon content, components and chemical stability in middle Ningxia Yellow River irrigation area over the past 40 years. The results showed that soil organic carbon in this area showed a progressive evolution with the years of development on the decade scale(15~35 years, 10 years as an interval), marked by a significant change of the distribution of soil labile organic carbon in 0—40 cm layer(15 years), soil labile organic carbon content in 10—20 cm layer (25 years), and soil organic carbon content in 10—40 cm layer(35 years). During this process, surface soil organic carbon content and composition in 0—10 cm layer, chemical stability of soil organic carbon in 0—40 cm layer remained unchanged. On the year scale (0~12 years, 3 years as an interval), total organic carbon and soil labile organic carbon contents of the plow layer (0—40 cm) increased firstly and then decreased. While the chemical stability of organic carbon kept stable in addition to the first three years of sharp decline. For the changes at the multi-scale of soil organic carbon in middle Ningxia Yellow River irrigation area, the quick and unstable changes occurred on the smaller time scale. But on the larger time scales, the contents of total soil organic carbon and labile soil organic carbon kept the gentle and gradual change, and increased significantly at last until 35 years. while organic carbon stability exhibited the stability across all the scales.

**Keywords:** soil organic carbon; labile organic carbon; chemical stability of soil organic carbon; pumping-Yellow River irrigation area; time scales

土地利用变化能够影响土壤水分和养分的分布和迁移,进而影响土壤的性质和质量。扬黄灌区建设是近40 a来宁夏中部干旱带土地利用类型发生变化的典型代表。在此过程中,土壤有机碳如何演变是决定灌区农田土壤质量的关键因素<sup>[1]</sup>。干旱区土壤有机碳含量较低,分解活动较弱,因此初级生产力越高,植物残体对土壤的归还越强,土壤就能够固定更多的有机碳<sup>[2]</sup>,这在中国西北干旱灌区得到普遍验证<sup>[3-5]</sup>,并与旱地农田开垦的有机碳衰减效应<sup>[6-7]</sup>形成鲜明对比。但是限于灌区开发年限尚短,缺乏长期定位监测数据,以及土壤有机碳自身变化周期属性的约束<sup>[8]</sup>,对于土壤有机碳变化的具体过程及其时间尺度上的临界特性等,依然不甚明了。

活性有机碳是土壤中不稳定,易氧化、分解、矿化的,对植物和微生物有较高活性的部分土壤碳素<sup>[9]</sup>。土壤活性有机质的大小和周转对地表覆盖、土地利用方式和管理措施及外界环境的变化等因素较为敏感,可以作为土壤潜在生产力以及由土壤管理措施引起土壤有机质变化的早期指标;土壤水溶性有机碳占总有机碳的百分比一般被作为表征土壤生物活性有机碳库周转的指标。因此,活性有机碳与土壤总有机碳的相对变化关系,是决定灌区农田土壤有机碳稳定性的一个重要指标<sup>[10]</sup>;两者在不同时间尺度上的对应变化格局,也是深入认识土壤有机碳库平衡过程的必要环节。但是相对土壤总有机碳,相关地区活性有机碳研究依然较少。

土壤变化是土壤性质在时间上的动态,可分为随机性、周期性、趋势性三种类型,不同的土壤性质其变化的时间尺度不同;土壤质量动态具有复杂的时空变异性,许多自然和人为的生态过程都会显著影响土壤质量的演变。宁夏中部干旱带在近40 a的时间内,陆续开发建设了固海、盐环定、红寺堡三大扬黄灌区,开发利用年限跨越10~40 a,为本研究提供了较为理想的研究模板,有助于克服以往研究时间跨度过小,样本量偏少与可比较性不足等问题。据此,本研究以宁夏中部不同开发年限的扬黄灌区为对象,开展有关灌溉农田土壤有机碳变化规律方面的研究,以进一步认识旱区灌溉活动影响下农田土壤质量演变规律及其对时间尺度的依赖性,为扬黄灌区农田土壤质量维护提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样地布设

按开发时间早晚,分别选取宁夏中部干旱带的红寺堡灌区(1998年—)、盐环定灌区(1988年—)、固海

灌区(1978年—),在每个灌区内选择早期开发建设的3~5个自然村落,通过农户访谈明确有关土地利用历史与管理水平,在此基础上,在每个村落内选择垦殖年限与灌区开发年限相近、空间上邻近、管理水平近似的灌溉玉米地(TC)3~5块作为重复取样样地,构成代尺度(15~35 a,10 a为最小单位)上的样地序列;并在每个自然村落临近选择一块天然草地(CK)做未利用地对照。另外,在红寺堡灌区光彩新村(开发前沙化较为严重,农田系推平沙丘后整地而来)按空间邻近、管理相似的原则,选择种植年限3,6,9,12 a的灌溉玉米地,每个年限选择3~5个地块作为重复取样样地,构成年尺度(0~12 a,3 a为最小单位)上的样地序列,并临近选择一块沙荒地做对照(0 a)。灌溉普遍采用小畦漫灌方式,1 a灌4水,灌溉定额900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,第1水3月中旬,第2水4月中旬,第3水6月中下旬,第4水8月中旬。土壤以沙化灰钙土为主,表层0—20 cm砂粒含量偏高(砂粒平均含量80%),下部为典型灰钙土土质(砂粒平均含量65%)。另外,灌区养殖业一般不发达,农田有机肥投入量较低,主要以速效氮磷化肥施用为主。

### 1.2 田间取样与分析测试

取样时间统一在2012年6月中旬。在每个取样样地内(面积300~500 m<sup>2</sup>),按S型5点取样法,分0—10,10—20,20—40 cm,土钻取样,分层混合。风干土壤样过2 mm筛,分析测试土壤总有机碳(SOC)、易氧化有机碳(LOC)。土壤总有机碳采用提前加浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>的重铬酸钾容量法测定;易氧化有机碳采用333.3 mmol/L高锰酸钾氧化法,作为活性有机碳的表征。

### 1.3 数据处理与分析

土壤有机碳化学稳定性(*S<sub>c</sub>*)用总有机碳与活性有机碳含量的比值大小表示,计算公式如下:

$$S_c = SOC / LOC$$

式中:SOC——总有机碳含量;LOC——易氧化有机碳含量。

灌区间的直接比较,由于空间跨度较大,往往难以克服一些非控制性因素的干扰,为进一步提高数据的可比较性以及分析结果的可靠性,同一灌区不同利用方式下相同土层间土壤总有机碳、活性有机碳与有机碳化学稳定性的差异显著性( $p=0.05$ )采用独立样本*t*检验方法,分析灌溉农田土壤质量的相对变化,在此基础上再综合分析不同灌区间的变化趋势。其他差异显著性( $p=0.05$ )采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和LSD多重比较方法。所有数据分析在SPSS 17.0上完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 代尺度上农田土壤有机碳含量、组成与化学稳定性的变化

随开发年限的延长,宁夏中部扬黄灌区农田耕作层(0—40 cm)土壤总有机碳和活性有机碳含量表现为一种相对平缓的上升趋势,但是土壤有机碳化学稳定性基本保持不变(表 1)。15~35 a 间,总有机碳和活性有机碳含量分别增加了 37.2% ( $p<0.05$ )、43.2% ( $p<0.05$ ),但是 15~25 a,25~35 a 间并未表现出显著性的增长( $p>0.05$ )。因此,即便经历了近 40 a 的开发建设,灌区农田土壤总有机碳和活性有机碳含量整体依然偏低(SOC:2.85~6.85 g/kg; LOC:0.60~1.38 g/kg)。土壤有机碳化学稳定性在 25 a 前后出现谷值(3.90),但是相对变化并不显著( $p>0.05$ ),说明土壤总有机碳和活性有机碳的变化具有较好的同步性,但在 25 a 前后活性有机碳的增加更为明显。

表 1 农田土壤有机碳随灌区开发年限的变化

指标	开发年限	均值	标准差	最小值	最大值
LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	15	0.81a	0.16	0.60	1.01
	25	1.06ab	0.18	0.82	1.31
	35	1.16b	0.24	0.79	1.38
SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	15	3.68a	0.52	2.85	4.11
	25	4.04ab	0.64	3.12	4.99
	35	5.05b	1.35	3.24	6.85
S <sub>c</sub>	15	4.70a	0.47	4.07	5.18
	25	3.90a	0.78	3.08	5.21
	35	4.46a	1.01	3.16	5.62

注:小写字母不同,代表不同年限间差异显著( $p<0.05$ )。

### 2.2 不同开发年限灌区土壤有机碳含量、组成与化学稳定性的相对变化

如表 2—4 所示,首先,红寺堡灌区(15 a)整体无显著差异( $p>0.05$ ),三个灌区 0—10 cm 土层所有有机碳指标无显著差异( $p>0.05$ ),三个灌区所有土层的有机碳化学稳定性无显著差异( $p>0.05$ )。其次,最早的显著性变化出现在盐环定灌区(25 a)10—20 cm 土壤活性有机碳含量上( $p=0.000$ ),农田为 1.14 g/kg,对照为 0.69 g/kg,相对增幅达 65.2%。最后,相对集中的显著性变化发生在固海灌区(35 a),10—20 cm 和 20—40 cm 土壤活性有机碳和总有机碳含量都出现显著( $p<0.05$ )或极显著( $p<0.01$ )的增长。三大灌区中,活性有机碳含量均值最高达 1.43 g/kg,总有机碳含量均值最高达 7.22 g/kg,都出现在固海灌区农田 10—20 cm 土层。

表 2 红寺堡灌区(1998—2012 年)土壤有机碳的相对变化

土层/cm	指标	处理	均值	标准差	<i>p</i> 值
0—10	LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	0.88a	0.15	0.514
		CK	0.94a	0.11	
	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	3.84a	0.47	0.742
		CK	3.95a	0.61	
	S <sub>c</sub>	TC	4.42a	0.56	0.689
		CK	4.25a	0.70	
10—20	LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	0.73a	0.06	0.969
		CK	0.73b	0.14	
	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	3.81a	0.77	0.717
		CK	3.60a	0.89	
	S <sub>c</sub>	TC	5.25a	1.28	0.675
		CK	4.93a	0.75	
20—40	LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	0.81a	0.11	0.125
		CK	0.71b	0.04	
	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	3.43a	0.21	0.218
		CK	2.88a	0.83	
	S <sub>c</sub>	TC	4.31a	0.57	0.577
		CK	4.01a	1.02	

注:*p* 值为同一土层同一指标不同处理间差异显著性检验值。小写字母不同代表同一利用方式下某一指标不同土层间差异显著( $p<0.05$ ),下同。

相对含量大小的变化,土壤有机碳垂直分布格局对开发年限更为敏感(表 2—4)。自然土壤垦殖后 0—40 cm 的总有机碳和活性有机碳由表聚型向均一型转变,但活性有机碳的变化(15 a)要早于总有机碳(25 a)。与此同时,有机碳化学稳定性基本维持均一性垂直分布格局不变。

表 3 盐环定灌区(1988—2012 年)土壤有机碳的相对变化

土层/cm	指标	处理	均值	标准差	<i>p</i> 值
0—10	LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	1.13a	0.16	0.081
		CK	0.90a	0.21	
	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	4.01a	0.87	0.267
		CK	3.43ab	0.49	
	S <sub>c</sub>	TC	3.61ab	0.91	0.607
		CK	3.89a	0.52	
10—20	LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	1.14a	0.07	0.000 *
		CK	0.69b	0.08	
	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	3.88a	0.81	0.072
		CK	2.78a	0.08	
	S <sub>c</sub>	TC	3.40a	0.65	0.143
		CK	4.08a	0.46	
20—40	LOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	0.87b	0.19	0.535
		CK	0.78ab	0.15	
	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	TC	3.96a	0.85	0.699
		CK	3.74b	0.41	
	S <sub>c</sub>	TC	4.56b	0.31	0.596
		CK	4.97a	1.45	

总体上,在 15~35 a 间,以 10 a 为单位的时间尺

度上,依次以 0—40 cm 活性有机碳垂直分布格局(15 a)、10—20 cm 活性有机碳含量(25 a)、10—40 cm 总有有机碳含量(35 a)的显著变化为标志,宁夏中部扬黄灌区农田土壤有机碳呈现出一种渐进式演变格局。在此过程中,表层 0—10 cm 土壤总有机碳和活性有机碳含量、0—40 cm 分层土壤有机碳化学稳定性维持不变。这种格局基本符合土壤有机碳变化的时间尺度约束特性<sup>[8]</sup>,也符合农田生态系统的长期碳平衡特性<sup>[11]</sup>,反映了代尺度上土壤有机碳变化的基本特性。

开发 25 a 前后,无论固海灌区<sup>[5]</sup>还是盐环定灌区土壤总有机碳含量的变化相对平缓,但是盐环定灌区 10—20 cm 土壤活性有机碳的含量开始出现显著的增长。说明在较长时间尺度上,土壤有机碳总量发生显著变化之前,主要是以活性有机碳相对快速的周转利用为途径,维持灌区农田土壤有机碳库的平衡与可利用性<sup>[12]</sup>。但是灌区农田土壤可能由于过于频繁的耕作扰动<sup>[1]</sup>,相对相邻的封育草地,有机碳的固定进程被大大拉长,直到 35 a 左右,10—40 cm 总有机碳含量才开始显著增加,而表层 0—10 cm 有机碳含量依然保持稳定。在此过程中,土壤有机碳的稳定性保持不变,说明土壤总有机碳和活性有机碳的变化具有较好的同步性。

表 4 固海灌区 1978—2012 年土壤有机碳相对变化

土层/cm	指标	处理	均值	标准差	<i>p</i> 值
0—10	LOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TC	1.20a	0.13	0.128
		CK	1.03a	0.12	
	SOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TC	6.10ab	0.86	0.316
		CK	6.69a	0.28	
	S <sub>c</sub>	TC	5.14a	1.01	0.097
		CK	6.56a	0.75	
10—20	LOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TC	1.43a	0.23	0.022*
		CK	0.90ab	0.09	
	SOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TC	7.22a	0.08	0.000*
		CK	4.89b	0.16	
	S <sub>c</sub>	TC	5.15a	0.86	0.647
		CK	5.47a	0.7	
20—40	LOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TC	1.28a	0.05	0.003*
		CK	0.83b	0	
	SOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	TC	5.01b	0.84	0.017*
		CK	2.34c	0.4	
	S <sub>c</sub>	TC	3.90a	0.66	0.087
		CK	2.83b	0.48	

2.3 农田土壤有机碳含量、组分与化学稳定性在年尺度上的变化

年尺度上土壤有机碳表现出一定的波动性变化特征(表 5)。以沙荒地为对照,0~3 a 间土壤总有机碳含量略有增加(增幅 1.4%),但不显著( $p>0.05$ ),

3~9 a 间由 1.48 g/kg(3 a),经 2.84 g/kg(6 a),增至 4.49 g/kg(9 a),累积增幅高达 203.4%,之后 9~12 a 间有所下降,降幅 11.4%,但不显著( $p>0.05$ )。活性有机碳的变化略有区别,0~3 a 间显著增加( $p<0.05$ ),3~6 a 间稳定在 0.54~0.52 g/kg 之间,6~9 a 间快速增加至 1.00 g/kg,9~12 a 间又显著下降到 0.86 g/kg;而有机碳化学稳定性在 0~12 a 间基本保持稳定,只是在 3 a 出现一个显著性的谷值(2.78, $p<0.05$ )。

表 5 不同利用年限农田耕作层 0—40 cm 土壤有机碳变化

指标	利用年限	均值	标准差	最小值	最大值
LOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	0	0.31a	0.06	0.25	0.36
	3	0.54b	0.04	0.50	0.59
	6	0.52b	0.06	0.46	0.57
	9	1.00c	0.08	0.93	1.09
	12	0.86d	0.10	0.77	0.97
SOC/ (g · kg <sup>-1</sup> )	0	1.42a	0.16	1.31	1.60
	3	1.48a	0.11	1.36	1.57
	6	2.84b	0.80	2.32	3.76
	9	4.49c	0.39	4.22	4.93
	12	3.98c	0.45	3.65	4.49
S <sub>c</sub>	0	4.67a	0.61	4.22	5.37
	3	2.78b	0.42	2.32	3.13
	6	5.44a	1.38	4.27	6.96
	9	4.49a	0.15	4.34	4.63
	12	4.62a	0.29	4.34	4.92

年尺度上土壤有机碳的波动性变化也出现在西北其他灌区中。新疆荒漠区绿洲新垦殖农田土壤有机碳含量在 0~5 a 内几乎呈线性快速增加,但是 5 a 以后总有机碳含量增长放缓(5~20 a),在 20 a 的周期内活性有机碳则经历了快速上升和缓慢下降的变化过程<sup>[5]</sup>。在宁夏扬黄灌区的有关研究中<sup>[9-10]</sup>也发现了早期土壤有机碳的明显增长趋势。本研究选取的光彩新村,开发前土壤沙化退化较为严重,有机碳含量很低,在有机肥料难以长期持续大量投入的前提下,在以 5 a 为单元的时间尺度上也存在一个相近似的快速增长至保持稳定或缓慢下降的变化格局,但是在连续增长的时间跨度上要明显长于荒漠区绿洲,而且总有机碳和活性有机碳的变化格局也有所区别。

3 结论

就干旱地区灌溉农田土壤有机碳的多尺度变化格局而言,其相对快速而不稳定的变化主要体现在较小的时间尺度上,垦殖 5 a 前后总有机碳和活性有机碳含量普遍出现大幅提高;5~10 a,视区域的不同,或维持相对稳定,或持续增长,或缓慢下降,并无一般性规律存在。如果研究尺度进一步拉大,宁夏中部扬

黄灌区农田土壤总有机碳和活性有机碳含量直到35 a左右才开始出现显著增长,在此过程中,则以一种相对平缓、渐进的方式不断推进其演变进程。而有机碳化学稳定性则表现出与时间尺度无关的不变性。但是限于研究方法的约束,有关的演变格局和驱动机制分析,依然有待长期定位监测数据资料的充实。

#### 参考文献:

- [1] 张国盛,黄高宝,ChanYIN. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展[J]. 生态学报,2005,25(2):351-357.
- [2] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志,1999,18(3):32-38.
- [3] 徐万里,唐光木,盛建东,等. 垦殖对新疆绿洲农田土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报,2010,30(7):1773-1779.
- [4] 陈留美. 新垦淡灰钙土土壤肥力质量演变及磷素形态转化的研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [5] 虞江萍,文云朝,汪一鸣,等. 宁夏扬黄灌溉对土壤环境的影响[J]. 地理科学进展,2000,19(3):279-284.
- [6] 李顺江,胡霞,刘连友. 开垦对退化沙质草地土壤机械组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(4):150-152.
- [7] 刘梦云,安韶山,常庆瑞. 宁南山区不同土地利用方式土壤有机碳特征研究[J]. 水土保持研究,2005,12(3):47-49.
- [8] 张凤荣,安萍莉,王军艳,等. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法[J]. 资源科学,2002,24(2):71-75.
- [9] Bastida F, Barberá G G, García C, et al. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions[J]. Applied Soil Ecology, 2008,38(1):62-70.
- [10] Laganier J, Angers D A, Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2010,16(1):439-453.
- [11] Campbell C A, Zentner R P, Liang B C, et al. Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan-Effect of crop rotations and fertilizers[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000,80(1):179-192.
- [12] 王胜佳,陈义. 多熟制稻田土壤有机质平衡的定位研究[J]. 土壤学报,2002,39(1):9-15.
- [11] 丁森林,孙希胜,王梅娟,等. 基于因子分析的平原地区土地利用效益评价:以山东省潍坊市为例[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):467-470.
- [12] 朱瑜馨,张锦宗. 对应分析在土地利用综合效益评价中的应用[J]. 地理科学进展,2010(4):478-482.
- [13] 陈琳琳,鲁春阳,文枫,等. 基于改进 TOPSIS 法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J]. 资源科学,2011,33(3):535-541.
- [14] 张荣天,焦华富. 泛长三角城市土地利用效益测度及时空格局演化[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(6):75-81.
- [15] 张明斗,莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析:以东北三省34个地级市为例[J]. 资源科学,2014,36(1):8-16.
- [16] 吴志伟,胡远满,陈文波. 基于 GIS 技术的土地利用效益评价研究[J]. 水土保持研究,2011,18(2):75-79.
- [17] 王雨晴,宋戈. 城市土地利用综合效益评价与案例研究[J]. 地理科学,2006,26(6):743-748.
- [18] 王国刚,刘彦随,方方. 环渤海地区土地利用效益综合测度及空间分异[J]. 地理科学进展,2013,32(4):649-656.
- [19] 杨佳惠,雷国平. 黑龙江省煤炭城市鸡西市的土地利用综合效益评价[J]. 水土保持研究,2012,19(6):176-179.
- [20] 李启权,张新,高雪松,等. 川中丘陵县域土地利用程度与效益耦合协调格局分析[J]. 农业现代化研究,2014,35(1):97-102.
- [21] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版,1994.
- [22] 郑华伟,张锐,刘友兆. 基于物元分析的土地利用系统健康诊断[J]. 中国土地科学,2012,26(11):33-39.
- [23] 全国爱国卫生运动委员会. 国家卫生城市标准[OL]. [http://www.nhfp.gov.cn/jkj/s5898/201405/a8ce63259ee640729671917865467\\_88.shtml](http://www.nhfp.gov.cn/jkj/s5898/201405/a8ce63259ee640729671917865467_88.shtml), 2014-05-16/2015-04-19.
- [24] 晋城市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[OL]. [http://www.jconline.cn/Contents/Channel\\_4445/2011/1122/741290/content\\_741290.htm](http://www.jconline.cn/Contents/Channel_4445/2011/1122/741290/content_741290.htm), 2011-11-22/2015-04-19.
- [25] 中国社会管理创新报告—社会改革与城市创新[M]. 北京:科学技术文献出版社,2013.
- [26] 张绍良,彭德福. 试论我国土地复垦现状与发展[J]. 中国土地科学,1999,13(2):1-5.
- [27] 黄辉玲,罗文斌,吴次芳,等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报,2010,26(3):317-321.
- [28] 余健,房莉,仓定帮,等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报,2012,28(5):261-265.

(上接第126页)