

DOI: 10.5846/stxb201303300562

李慧,汪景宽,裴久渤,李双异.基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究.生态学报,2015,35(2):517-525.

Li H, Wang J K, Pei J B, Li S Y. Equilibrium relationships of soil organic carbon in the main croplands of northeast china based on structural equation modeling. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 517-525.

# 基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究

李 慧,汪景宽\*,裴久渤,李双异

沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866

**摘要:**土壤有机碳平衡是一个复杂的过程,是潜变量与潜变量,潜变量与可测变量及可测变量之间相互作用的结果。结构方程模型的建立很好地描述了这一复杂关系。应用 2011 年东北地区敦化、榆树、公主岭、昌图和新农 5 个典型县(市)农田表层土壤有机碳(0—20 cm)数据,建立了东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系结构方程模型,探讨了影响有机碳平衡关系的各潜变量和可测变量的相互影响关系。结果表明:在土壤有机碳的平衡过程中,潜变量之间(气候环境、土壤性质和人为管理)具有两两相关性,土壤性质对有机碳平衡具有直接正向作用,其路径系数为 1.01;气候环境和人为管理通过土壤性质传递并影响土壤有机碳平衡,且气候环境的影响力大于人为管理的影响力,其路径系数分别为 1 和 0.87。因此,针对有机碳平衡关系计算出的路径系数,需要强化人为管理在土壤有机碳平衡过程中的作用,特别要在耕作方式上加强管理,促使有机碳平衡向更优化方向发展。

**关键词:**潜变量;路径系数;影响因素;耕作方式

## Equilibrium relationships of soil organic carbon in the main croplands of northeast china based on structural equation modeling

LI Hui, WANG Jingkuan\*, PEI Jiubo, LI Shuangyi

College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

**Abstract:** Soil organic carbon equilibrium (SOCE) is a complex process determined by the interactions between of different latent variables, or between measurable variables, and between the latent and measurable variables. The interaction relationships could be well expressed by the structural equation modeling (SEM). Based on the surface soil (0—20 cm) data of some typical counties (Dunhua, Yushu, Gongzhuling, Changtu and Fuxin) in the Northeast China, a SEM of soil organic carbon equilibrium in those counties was simulated, and the relationships of SOCE as affected by different variables were evaluated. The results indicated that there were significant interactions between latent variables (climate regimes, soil properties and management practices). Soil properties had a direct positive effect on SOCE with a path coefficient 1.01, while climate regimes and management practices influenced on SOCE indirectly through soil properties. Moreover, the influence of climate was greater than that of the management with path coefficients of 1 and 0.87, respectively. According to the path coefficients calculated by the SEM on SOCE, it is very important to pay more attention to the effect of human activities (especially tillage practices), on the process of SOCE and it is extremely crucial to optimize SOCE by a better development.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41171237);中国科学院战略性先导科技专项子课题“东北农田土壤固碳潜力与速率研究”(XDA05050501)

**收稿日期:**2013-03-30; **网络出版日期:**2014-03-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: j-kwang@163.com

**Key Words:** latent variables; path coefficients; impact factors; tillage practices

陆地生态系统碳循环研究对于应对全球气候变暖具有重要意义,土壤碳固定是减缓温室气体排放的主要途径之一<sup>[1-2]</sup>。土壤有机碳的平衡是一个复杂的过程,不仅受气候、植被、土壤属性、地形等自然因素影响,也受土地利用变化、耕种管理措施等人为因素的影响,且各种因素之间也存在相互作用。多种影响因子共同决定着土壤有机碳在空间上的分布和再分布格局,以及土壤有机碳的形成、分解的转化方向 and 变化速率<sup>[3-8]</sup>。

在土壤有机碳平衡关系研究中,人们多从定性的角度来分析影响有机碳的平衡因素,即使进行定量化研究也仅仅采用回归分析、因子分析、相关性分析、多变量方差分析等<sup>[9]</sup>传统的方法来阐述各要素之间的关系。但是,这些方法仅限于可测变量的自变量与因变量之间的关系分析,事实上,可测变量不能完全描述有机碳平衡之间的内在关系,更需要弄清潜变量之间的关系,因为潜变量及其关系往往决定了有机碳平衡发展的方向<sup>[10]</sup>。结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)解决了这一问题,该模型思想起源于 20 世纪 20 年代 Sewall 提出的路径分析概念<sup>[11-12]</sup>,Judea 正式将其定义为结构方程模型<sup>[13]</sup>。目前该模型已在心理学、行为科学、教育学得到很大程度的应用,取得了较好的效果<sup>[14-16]</sup>。在农业方面,王继军等初步将结构方程模型在农业生态经济系统中进行了应用<sup>[10]</sup>;在土壤有机碳的研究中,Brahim 等应用了结构方程模型对半干旱的地中海地区的土壤有机碳和土壤理化性质进行了研究<sup>[17]</sup>。

我国东北地区是主要的粮食生产基地,旱田占农田总面积的 86.49%<sup>[18]</sup>,弄清东北地区旱田土壤有机碳平衡关系对于提高土壤有机碳固碳潜力和指导农业生产具有重要的现实意义。基于此,本研究应用东北地区典型粮食生产基地(敦化市、榆树市、公主岭市、昌图县和阜宁县 5 个典型市县)的 99 个采样点数据,运用结构方程模型探讨了东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系,以期东北地区旱田土壤有机碳的循环和固定研究提供参考和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

东北地区主要包括辽宁省、吉林省和黑龙江省。本研究选取辽宁省阜新县和昌图县,吉林省公主岭市、敦化市和榆树市作为研究区域(图 1)。其中,阜新县位于辽宁西部,地理位置为 121°1′—122°46′E,41°41′—42°56′N,耕地面积约占辖区面积 35%,土壤类型以褐土为主;昌图县位于辽宁省最北部,松辽平原南端,辽、吉、蒙三省(区)交界,地理位置为 123°32′—124°26′E,42°23′—43°29′N,耕地面积约占辖区面积 65%,是我国东北重要商品粮基地县,土壤类型以棕壤和黑土为主;公主岭市地处吉林省中西部,松辽平原腹地,位于 124°02′—125°18′E,43°11′—44°9′N,耕地面积约占所辖区面积 55%,是国家首批确定的商品粮基地之一,土壤类型以黑土为主;敦化市位于吉林省东部山区,长白山腹地,四周环山,地处 127°28′—129°13′E,42°42′—44°30′,耕地面积约占辖区面积 9%,土壤类型以灰棕壤为主;榆树市地处吉林省中北部,地理位置为 126°01′—127°05′E,44°30′—45°15′N,耕地面积约占辖区面积 68%,该市坐落在世界黄金玉米带上,是吉林省著名的产粮大市,也是全国重点商品粮基地,被誉为“天下第一粮仓”,主要土壤类型为黑钙土。

### 1.2 数据来源

采样点是土壤调查过程中最小的基本单元,选择采样点数据进行分析更具可操作性。研究区共采集 2011 年表层土壤(0—20 cm)采样点 114 个,根据覆盖多种地貌类型、土壤类型的原则进行采样,采样时在中心样点四周呈辐射状另采 4 个样点,用四分法对 5 个样点混合样进行选取,以减小采样误差。每个中心样点均采用 GPS 进行定位,样点间距约为 0.5km,并详细记录了样点的气候、土壤性质、农户管理等数据资料,通过整理和筛选,本研究共选取其中 99 个有效样点进行模型的构建(图 1)。

### 1.3 研究方法

结构方程模型(SEM)是基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的一种方法。目前最常用的是线性

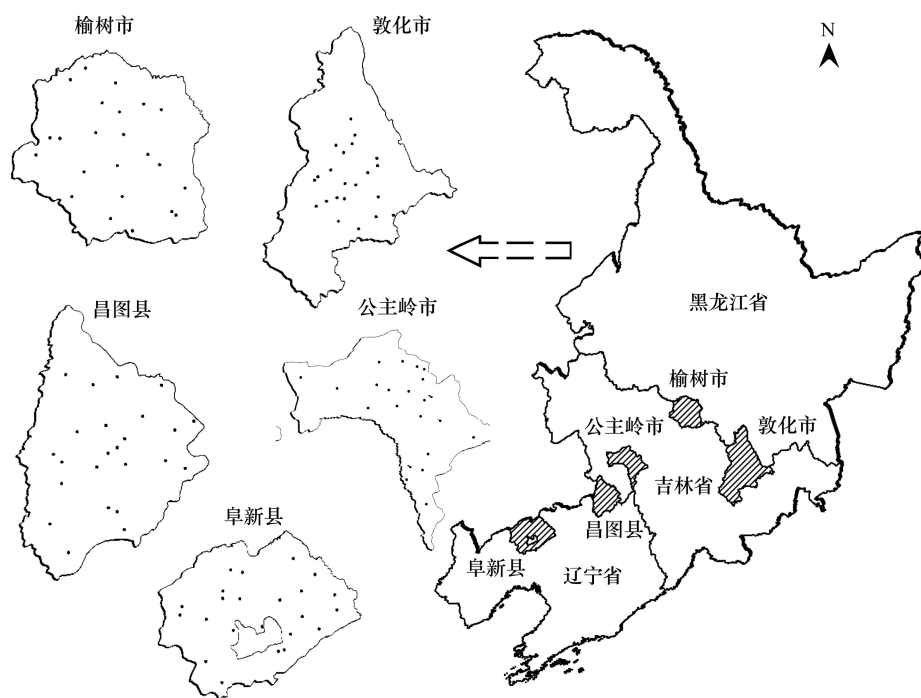


图1 研究区采样点位置

Fig.1 Location of sampling sites in study areas

结构方程模型。结构方程模型有效地整合了统计学的因子分析与路径分析两大主流技术,主要用于对复杂的多变量研究数据进行处理。该方法是一种集因子分析和通径分析于一身的可以描述不可直接测量变量之间关系的多元统计方法<sup>[19]</sup>,属于验证性模型。在结构方程模型中包含了两种变量,一种是可以测量的显变量,一种是不可直接测量的潜变量。结构方程模型由测量方程和结构方程两部分构成,测量方程是用来描述潜变量和显变量之间的关系,结构方程是用来描述潜变量与潜变量之间的关系。由下列方程表示:

$$x = \Lambda_x \xi + \delta \quad (1)$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (3)$$

其中,方程(1)和方程(2)被称之为测量方程,方程(3)则是结构方程。 $x$  是外生可测变量向量; $\xi$  是外生潜变量向量; $y$  是内生可测变量向量; $\eta$  是内生潜变量向量; $\Lambda_x$  为外生可测变量与外生潜变量之间的关系,是外生可测变量在外生潜变量上的因子负荷矩阵; $\Lambda_y$  为内生可测变量与内生潜变量之间的关系,是内生可测变量在内生潜变量上的因子负荷矩阵; $B$  是内生潜变量的关系阵; $\Gamma$  则表示外生潜变量对于内生潜变量的影响; $\delta$  和  $\varepsilon$  为测量方程的误差项; $\zeta$  为结构方程的误差项。

#### 1.4 软件平台

数据处理采用软件 Microsoft Excel 和 SPSS19.0。模型运行采用 Amos 7.0。

## 2 东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系概念模型建立与计算

### 2.1 概念模型建立

根据东北地区土壤有机碳变化的特征,建立东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系的概念模型(图2),模型包括4个潜变量:自然环境  $\xi_1$ 、土壤性质  $\xi_2$ 、人为管理  $\xi_3$  和土壤碳平衡  $\eta$ ;10个可测变量:年均温度  $x_1$ 、年均降水量  $x_2$ 、坡度  $x_3$ 、土壤质地  $x_4$ 、pH  $x_5$ 、肥料施用量  $x_6$ 、秸秆施用量  $x_7$ 、耕种方式  $x_8$ 、作物单产  $y_1$  和土壤有机碳含量  $y_2$ 。

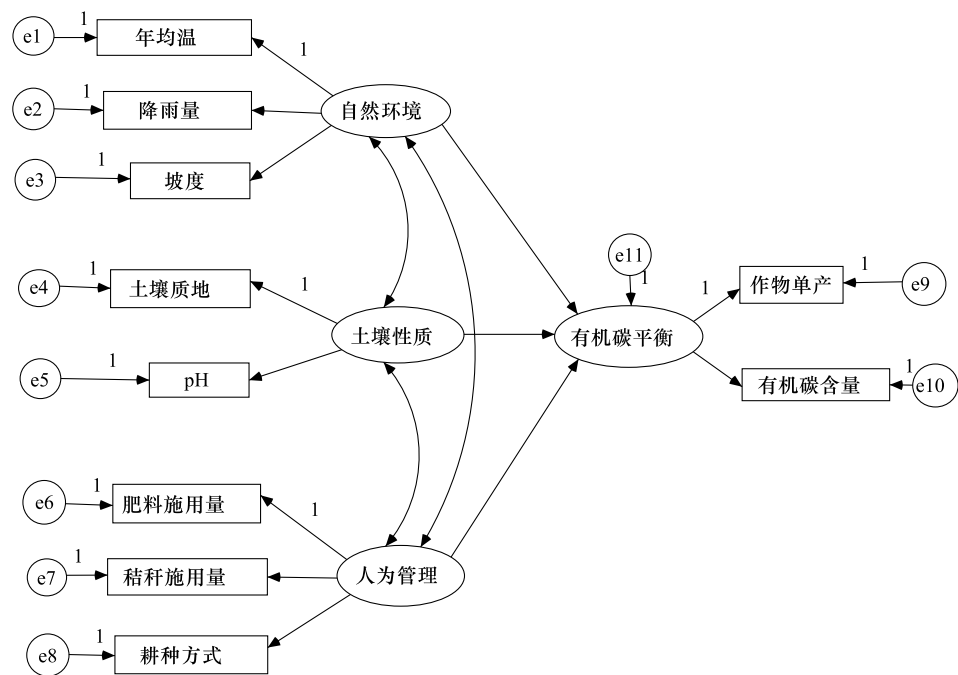


图2 有机碳平衡关系概念模型(测量模型和结构模型)  
Fig.2 Conceptual model of organic carbon equilibrium(measurement model and structural model)

根据前人对于影响有机碳平衡关系及因素的分析,对于概念模型,给出如下假设:

- 假设 1 自然环境对土壤有机碳平衡有正向的影响
- 假设 2 土壤性质对土壤有机碳平衡有正向的影响
- 假设 3 人为管理对土壤有机碳平衡有正向的影响
- 假设 4 自然环境与土壤性质有相互影响
- 假设 5 土壤性质与人为管理有相互影响
- 假设 6 自然环境与人为管理有相互影响

2.2 结构方程计算

(1)结构方程模型数据处理及信度分析

应用 SPSS19.0 对 99 个采样点数据进行分析处理,进行数据的有效度,即信度分析,信度分析结果如表 1,4 个潜变量的信度值分别为 0.751、0.736、0.76、0.705,信度均大于 0.7,认为数据具有较好的一致性。

(2)东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系的结构方程模型模拟

结构方程模型是一个验证性模型,是一个拟合、评价、修正、再评价的反复过程,直至模型不仅具有统计学的理论意义,而更能从现实角度出发具有现实意义。

对已建立的概念模型和假设,利用 Amos 7.0 进行第一次初始模型拟合,拟合结果如图 3,模型拟合系数评价结果见表 2。可以看出,人为管理对土壤有机碳平衡路径系数/载荷系数是否显著加以判定的 P 值为

| 表 1 各变量一览表及数据信度值                  |                      |                  |
|-----------------------------------|----------------------|------------------|
| 潜变量                               | 可测变量                 | 可信度              |
| Latent variables                  | Measurable variables | Cronbach's alpha |
| 自然环境 $\xi_1$<br>Nature conditions | 年均温度 $x_1$           | 0.751            |
|                                   | 年均降水量 $x_2$          |                  |
|                                   | 坡度 $x_3$             |                  |
| 土壤性质 $\xi_2$<br>Soil properties   | 土壤质地 $x_4$           | 0.736            |
|                                   | pH $x_5$             |                  |
| 人为影响 $\xi_3$<br>Human management  | 肥料施用量 $x_6$          | 0.76             |
|                                   | 秸秆施用量 $x_7$          |                  |
|                                   | 耕种方式 $x_8$           |                  |
| 土壤碳平衡 $\eta$<br>SOC equilibrium   | 作物单产 $y_1$           | 0.705            |
|                                   | 土壤有机碳含量 $y_2$        |                  |

0.631,表明该路径系数为零的概率达到了 63.1%,大于 5%的显著性水平,没有足够理由认为其在 95%置信水

平下与零存在显著性差异,显著性检验没有通过。模型拟合指数显示模型拟合一般。依据建立模型的实际意义,需要对路径系数进行释放,采纳修正指数的建议,对模型进行第二次拟合,通过模型的多次反复拟合、修正和运算,直至各路径系数均通过显著性检验(表3),最终得出标准化系数修正模型(图4)和潜变量及可测变量之间总的影响效果(表4)。

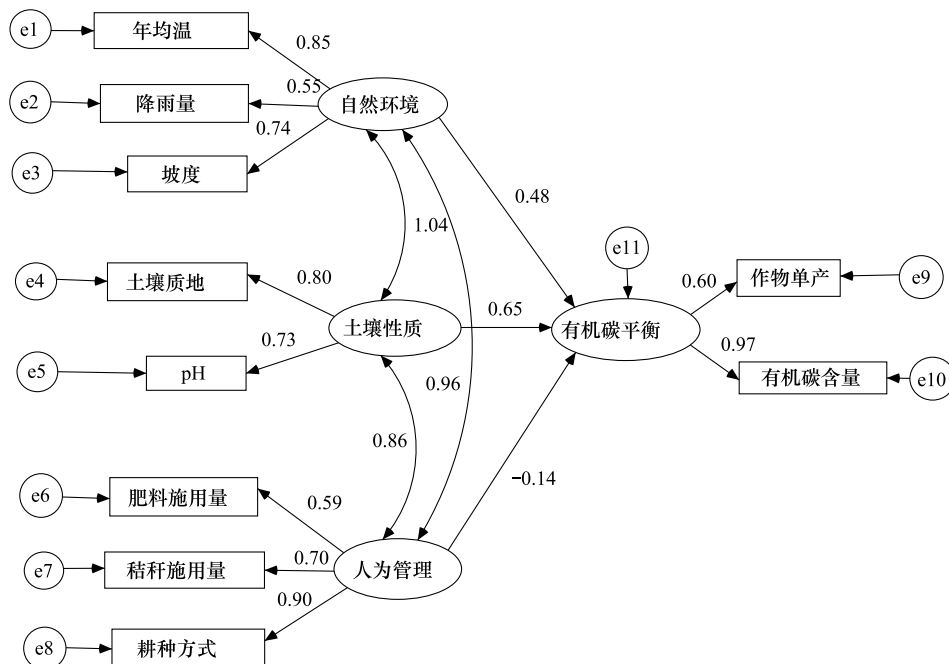


图3 结构方程模型第一次拟合参数估计结果图

Fig.3 The first fitting results of parameter estimation

表2 第1次模型拟合系数估计结果

Table 2 The first estimated results of modeling fitting coefficient

|                                              | 评价系数<br>Evaluation coefficient | P     |
|----------------------------------------------|--------------------------------|-------|
| 有机碳平衡←自然环境 SOC equilibrium←Nature conditions | 0.171                          | 0.311 |
| 有机碳平衡←土壤性质 SOC equilibrium←Soil properties   | 0.378                          | 0.04  |
| 有机碳平衡←人为管理 SOC equilibrium←Soil properties   | -0.125                         | 0.631 |
| x1←自然环境 x1←Nature conditions                 | 1                              |       |
| x2←自然环境 x2←Nature conditions                 | 0.473                          | * * * |
| x3←自然环境 x3←Nature conditions                 | 0.549                          | * * * |
| x7←人为管理 x7←Human management                  | 1.562                          | * * * |
| x8←人为管理 x8←Human management                  | 2.562                          | * * * |
| x6←人为管理 x6←Human management                  | 1                              |       |
| x9←有机碳平衡 x9←SOC equilibrium                  | 1                              |       |
| x10←有机碳平衡 x10←SOC equilibrium                | 2.573                          | * * * |
| x4←土壤性质 x4←Soil properties                   | 1                              |       |
| x5←土壤性质 x5←Soil properties                   | 0.857                          | * * * |

P 表示假设检验中的概率; \* \* \* 表示在  $P < 0.05$  水平显著

### 3 结果与分析

#### 3.1 模型假设分析

在模型反复拟合、评价、修正过程后得到了如图4的最后标准化系数修正模型,其结果表明初始模型假设



中自然环境对有机碳平衡状态有正向的影响以及人为管理对有机碳平衡状态有正向的影响的两个假设不被模型拟合的结果支持(表 5)。

3.2 模型拟合指数分析

运用 Amos7.0 进行结构方程模型的分析,可以得到较多的拟合指数,根据许多学者对结构方程模型相关研究的建议,本研究采用绝对拟合指数、相对拟合指数和精简指数三类拟合指数,包括  $\chi^2/df$ 、GFI、RMSEA、NFI、TLI、CFI、IFI、AIC 和 ECVI,并确定了拟合标准,分别为  $\chi^2/df$  大于 10 表示模型很不理想,小于 5 可以接受,小于 3 则模型拟合较好;RMSEA 介于 0—1 之间,小于 0.05 表示模型拟合较好,GFI、NFI、TLI、CFI、IFI 应大于 0.9,且越接近 1 越好,AIC 和 ECVI 数值越小越好。本研究修正后模型拟合指数分析结果如表 6 所示。模型拟合指数总体表现较好,均达到拟合指数要求,认为从统计学角度经过修正后得到的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系模型比较合理。

表 3 第 3 次模型拟合系数估计结果  
Table 3 The third estimated results of modeling fitting coefficient

|            | 评价系数<br>Evaluation<br>coefficient | P     |
|------------|-----------------------------------|-------|
| 有机碳平衡←土壤性质 | 0.577                             | * * * |
| x1←自然环境    | 1                                 |       |
| x2←自然环境    | 0.478                             | * * * |
| x3←自然环境    | 0.556                             | * * * |
| x7←人为管理    | 1.557                             | * * * |
| x8←人为管理    | 2.597                             | * * * |
| x6←人为管理    | 1                                 |       |
| x9←有机碳平衡   | 1                                 |       |
| x10←有机碳平衡  | 2.556                             | * * * |
| x4←土壤性质    | 1                                 |       |
| x5←土壤性质    | 0.847                             | * * * |

P 表示假设检验中的概率; \* \* \* 表示在 P < 0.05 水平显著

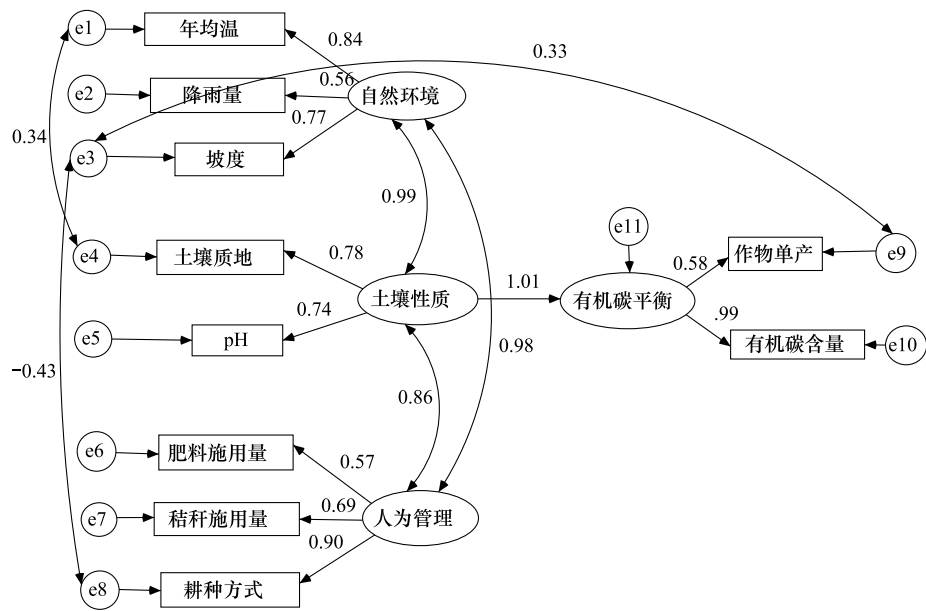


图 4 有机碳平衡关系标准化系数修正模型  
Fig.4 Standardized coefficients correction model of organic carbon equilibrium

表 4 潜变量及可测变量之间总的影响效果情况  
Table 4 Total effects between latency variables and measurable variables

| 指标<br>Indices                | 土壤性质<br>Soil properties | 人为管理<br>Human management | 自然环境<br>Nature conditions | 有机碳平衡<br>SOC equilibrium |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 有机碳平衡 SOC equilibrium        | 1.008                   | 0.000                    | 0.000                     | 0.000                    |
| 土壤质地 Soil texture            | 0.785                   | 0.000                    | 0.000                     | 0.000                    |
| 坡度 Slope                     | 0.000                   | 0.000                    | 0.767                     | 0.000                    |
| 耕种方式 Cultivation pattern     | 0.000                   | 0.899                    | 0.000                     | 0.000                    |
| 秸秆施用量 Applying straw content | 0.000                   | 0.694                    | 0.000                     | 0.000                    |

| 续表                               |                         |                          |                           |                          |
|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 指标<br>Indices                    | 土壤性质<br>Soil properties | 人为管理<br>Human management | 自然环境<br>Nature conditions | 有机碳平衡<br>SOC equilibrium |
| 有机碳含量 SOC content                | 0.993                   | 0.000                    | 0.000                     | 0.986                    |
| 肥料施用量 Fertilizer use             | 0.000                   | 0.568                    | 0.000                     | 0.000                    |
| 作物单产 Crop yields                 | 0.586                   | 0.000                    | 0.000                     | 0.582                    |
| 年均温 Average annual temperature   | 0.000                   | 0.000                    | 0.837                     | 0.000                    |
| pH                               | 0.737                   | 0.000                    | 0.000                     | 0.000                    |
| 降雨量 Average annual precipitation | 0.000                   | 0.000                    | 0.564                     | 0.000                    |

| 表 5 模型假设结果验证表                                    |                    |                 | 表 6 拟合指数表                         |             |                              |               |
|--------------------------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------|------------------------------|---------------|
| Table 5 Verification results of model assumption |                    |                 | Table 6 Fitting coefficients list |             |                              |               |
| 模型假设<br>Modeling assumption                      | 假设内容<br>Contents   | 假设结果<br>Results | 指数名称<br>Indices name              |             | 评价标准<br>Evaluation criterion | 结果<br>Results |
| 假设 1<br>Hypothesis 1                             | 自然环境对土壤有机碳平衡有正向的影响 | 不支持             | 绝对拟合指数                            | $\chi^2/df$ | <3                           | 1.82          |
| 假设 2<br>Hypothesis 2                             | 土壤性质对土壤有机碳平衡有正向的影响 | 支持              | Absolute fitting index            | GFI         | >0.9                         | 0.907         |
| 假设 3<br>Hypothesis 3                             | 人为管理对土壤有机碳平衡有正向的影响 | 不支持             | 相对拟合指数                            | NFI         | <0.1                         | 0.091         |
| 假设 4<br>Hypothesis 4                             | 自然环境与土壤性质有相关影响     | 支持              | Relative fit index                | TLI         | >0.9                         | 0.928         |
| 假设 5<br>Hypothesis 5                             | 土壤性质与人为管理有相关影响     | 支持              |                                   | CFI         |                              | 0.944         |
| 假设 6<br>Hypothesis 6                             | 自然环境与人为管理有相关影响     | 支持              | 精简指数                              | IFI         |                              | 0.965         |
|                                                  |                    |                 | Compact index                     | AIC         | 越小越好                         | 0.966         |
|                                                  |                    |                 |                                   | ECVI        | 越小越好                         | 104.969       |
|                                                  |                    |                 |                                   |             |                              | 1.141         |

### 3.3 模型计算结果分析

(1) 对于有机碳平衡应该重点提升人为管理这一潜变量

土壤性质对有机碳平衡状态有正向的影响,路径系数为 1.01,影响巨大;自然环境、土壤性质和人为管理具有两两相关关系。自然环境与土壤性质的相关系数为 0.99,相关性极大,从可测变量中可以看出,年均温和土壤性质有较程度的相关性,气候环境影响着土壤的形成和发展,如降水对其进行着水分的调节与分配,同时土壤自身对气候环境有着影响;土壤性质与人为管理相关系数为 0.86;自然环境与人为管理相关系数为 0.98,相关性极大,从可测变量中可以看到,坡度与耕作方式有很大程度的相关性。气候环境和人为管理对有机碳平衡状态均为间接效应,其间接影响路径系数分别为 1 和 0.87,自然环境的间接影响效应大于人为管理的效应,因此,对于有机碳平衡的影响自然环境更大些。这一结论与最初建立模型假设不符,究其原因,主要是在人们常规的认知中,自然环境和人为管理都直接影响着土壤有机碳的变化,但是细究之,不难发现,不论是气候环境里的温度、降水和坡度还是人为管理中的肥料施用量、秸秆施用量和耕作制度都是作用在土壤本身,而碳也同样依附在土壤中,所以自然环境和人为管理都是通过土壤的性质间接地影响着土壤有机碳的平衡。从图 4 和上述论述可以得出,土壤性质对土壤有机碳平衡的影响是直接的,路径系数为 1.01,气候环境和人为管理对有机碳平衡状态均为间接效应,其间接影响路径系数分别为 1 和 0.87,气候环境和土壤性质对有机碳平衡的影响相当高,因此可以说,在未来有机碳平衡研究和实践过程中,应重点提升人为管理这一潜变量。

(2) 反映各个潜变量的可测变量之间存在重要的相互影响的关系

有机碳平衡的过程是一个多因素共同作用的过程,潜变量之间的关系揭示了有机碳平衡的主线,可测变量除了表征潜变量外,相互之间的关系使其间接地影响了相关潜变量,进一步揭示了各个潜变量之间的间接关系。由可测变量之间的互动关系可进一步显示有机碳平衡过程中各个潜变量所代表的系统之间作用的重点,对潜变量的现状关系做出进一步解释<sup>[17]</sup>。从表 4 可以看出,可测变量作物产量除了表征有机碳平衡这一潜变量外,同时与土壤性质这一潜变量相关,其影响系数为 0.568;而可测变量有机碳含量除了表征有机碳平衡这一潜变量外,对土壤性质也有着间接影响,其影响系数高达 0.993。这与土壤性质对有机碳平衡具有正向直接影响的结果相吻合。

### (3) 表征潜变量的各个可测变量对其潜变量的贡献程度有差异

从土壤有机碳平衡潜变量的两个可测变量来看,有机碳含量贡献程度大于作物单产,其路径系数分别为 0.99、0.58,这个与实际情况相符;从自然环境潜变量的两个可测变量来看,年均温对于自然环境的贡献最大,其次为坡度,最后为降雨量,其路径系数依次为 0.84、0.77、0.56,公认温度对土壤有机碳影响较大,是影响关系和趋势较为明显的可测变量;坡度影响着有机碳在空间上的迁移和再分布,也是影响较明显的可测变量;而降雨量对土壤有机碳平衡影响较为复杂,易受到其他因素的影响;从土壤性质潜变量的两个可测变量可以看出,土壤质地和 pH 对土壤性质的表征比较接近,土壤性质略微大于 pH,分别为 0.77 和 0.74;对于人为管理这个潜变量,耕种方式这一可测变量影响较大些,其次为秸秆施用量,最后为肥料施用量,其路径系数依次为 0.9、0.69、0.57,根据路径系数的结果判定,应对人为管理这个潜变量中的耕作方式进行更为科学合理的管理,以使有机碳平衡向更高状态平衡发展。

## 4 结论与讨论

土壤有机碳平衡是一个复杂的动态过程,是潜变量与潜变量、潜变量与可测变量、可测变量与可测变量相互作用的结果。结构方程模型的建立很好地描述了这一复杂关系。本研究通过对东北地区 5 个典型市县结构方程模型的建立、运算和分析表明:土壤性质对有机碳平衡具有直接影响作用;在土壤有机碳的平衡过程中,气候环境、土壤性质和人为管理具有两两相关性,且气候环境和人为管理通过土壤性质传递并影响土壤有机碳平衡,气候环境的影响力大于人为管理的影响力。针对有机碳平衡关系所计算出的路径系数,需要强化人为管理在土壤有机碳平衡过程中的作用,特别要在耕作方式上加强管理,促使有机碳平衡向更优化方向发展。

当然本研究探索性地将结构方程模型引入了土壤有机碳平衡关系研究中,量化研究影响有机碳平衡的因素,研究结果是由已有现状数据所支撑的,是反映当前状态下的有机碳平衡关系,对于其形成的历史根源及未来的发展趋势尚难以定论。因此,对于不同时期、不同尺度和不同条件下的有机碳平衡关系则需要更加完善和翔实指标和调查数据来拟合,从而使结论更具科学性和准确性。

### 参考文献 (References):

- [1] Lal R. World soils and the greenhouse effect. IGBP Global Change Newsletter, 1999, 37: 4-5.
- [2] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 282-289.
- [3] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响. 地理学报, 2003, 58(5): 727-734.
- [4] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, (1): 11-17.
- [5] Dalal R C, Carter J O. Soil organic matter dynamics and carbon sequestration in Australian tropical soils//Lal R, Stewart B A, eds. Global Climate Change and Tropical Ecosystems. Advances in Soil Science. CRC Press, Lewis, 2000: 283-314.
- [6] Bottner P, Austrui F, Cortez J, Billès G, Couteaux M M. Decomposition of <sup>14</sup>C and <sup>15</sup>N labelled plant material, under controlled conditions, in coniferous forest soils from a north-south climatic sequence in western Europe. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(5): 597-610.
- [7] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. Nature, 2000, 404(6780): 858-861.
- [8] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.



- [ 9 ] 吴兆龙, 丁晓. 结构方程模型的理论、建立与应用. 科技管理研究, 2004, ( 6 ): 90-95.
- [ 10 ] 王继军, 李慧, 苏鑫, 杜娜. 基于农户层次的陕北黄土丘陵区农业生态经济系统耦合关系研究. 自然资源学报, 2010, 25( 11 ): 1887-1896.
- [ 11 ] 易丹辉. 结构方程模型方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- [ 12 ] Wright S. Correlation and causation, *Journal of Agricultural Research*, 1921, 20: 557-585.
- [ 13 ] Pearl J. *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [ 14 ] 孙凤. 主观幸福感的结构方程模型. 统计研究, 2007, 24( 2 ): 27-32.
- [ 15 ] 王雪原, 王宏起. 区域科技创新资源配置系统结构方程模型及模式选择. 技术经济, 2008, 27( 12 ): 36-42.
- [ 16 ] 李焕荣, 苏敷胜. 人力资源管理与企业绩效关系的实证研究——基于结构方程模型理论. 华东经济管理, 2009, 23( 4 ): 102-108.
- [ 17 ] Brahim N, Blavet D, Gallali T, Bernoux M. Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2011, 8( 2 ): 305-320.
- [ 18 ] 国家统计局农村社会经济调查总队. 2012 年中国农村统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2013: 55-56.
- [ 19 ] 侯杰泰, 温忠麟, 成子娟. 结构方程模型及其应用. 北京: 教育科学出版社, 2004: 123-178.