

基于土壤三相的广义土壤结构的定量化表达

王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟*

(东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要:以基于土壤固、液、气三相为研究对象的广义土壤结构为切入点, 借鉴微观经济学中柯布-道格拉斯生产函数边际递减效益的思想, 通过构建旱作土壤条件下土壤三相“投入”与土壤结构“产出”的土壤结构生产函数, 定义了广义土壤结构指数 ($GSSI$), $GSSI = [(X_s - A)X_LX_G]^k$ 。同时根据二维三系图中土壤结构相对理想三相点变化的趋势, 计算了土壤三相结构距离 ($STPSD$)。结合典型黑土区马铃薯耕地土壤深松整地前后土壤结构的变化与广义土壤结构指数和土壤三相结构距离的计算结果, 验证了广义土壤结构指数可以有效反映土壤结构特征及其动态变化。在此基础上, 采用 281 个旱作土壤样本数据对广义土壤结构指数与土壤三相结构距离之间的关系进行了拟合, 二者之间存在极显著的线性关系 ($R^2 = 0.86^{**}$)。可以认为, 广义土壤结构指数与土壤三相结构距离均能作为定量描述土壤结构变化的综合指标, 不仅为深入研究广义土壤结构提供了一种新方法, 而且为定量研究土壤结构、功能与质量奠定了基础。

关键词:土壤三相; 广义土壤结构指数; 土壤三相结构距离; 定量化; 旱作土壤

文章编号: 1000-0933(2009)04-2067-06 中图分类号: S152.4 文献标识码: A

Quantification of generalized soil structure based on soil three phases

WANG En-Heng, ZHAO Yu-Sen, CHEN Xiang-Wei*

Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2067 ~ 2072.

Abstract: A generalized soil structure index ($GSSI$) was developed to predict the structure properties based on solid, liquid, and gas phases for dry land soil with the diminishing marginal productivity in the Cobb-Douglas production function for reference. $GSSI$ is defined as $GSSI = [(X_s - A)X_LX_G]^k$, where A and K are the constants for dry land soil, the subscripts S , L and G denote solid, liquid and gas, respectively. Soil three-phase structure distance ($STPSD$) between the ideal 3-phase condition and that of a given soil was calculated in 2-D space. The $GSSI$ was validated a typical black soil of Northeast of China producing potatoes both before and after subsoiling operation. Results indicate that the $GSSI$ can effectively reflect subsoiling impact on this dynamic property. Based on this, 281 soil samples were collected and used in the data-fitting of the relationship between $GSSI$ and $STPSD$, giving a highly significant linear relationship, $R^2 = 0.86^{**}$. It is suggested that $GSSI$ and $STPSD$ can be used as a quantitative index to describe soil structural change affecting soil quality.

Key Words: soil three phases; generalized soil structure index; soil three-phase structure distance; quantification; dry land soil

土壤结构一般定义为土壤初级颗粒与次级颗粒的三维排列和组合^[1]。由于自然界中土粒的排列极其复杂, 很难用简单的几何特征概括描述, 迄今尚未有共识的方法来综合定量表征土壤结构^[2,3]。国内外许多学者常把土壤结构与土壤团聚体作为同义词来使用, 并通过传统的筛分和现代的 CT 扫描、三维影像分析等方

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30872068); 黑龙江省重大科技攻关资助项目(GA06B302-3)

收稿日期: 2007-12-03; 修订日期: 2008-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenxwnefu@yahoo.com.cn

法获取团聚体大小、形状及分布等信息来直接或间接反映和描述土壤结构特征,并建立相关模型^[4~9]。但也有学者对采用团聚体作为土壤结构指标存在质疑,认为在任何尺度上,土壤结构的功能特点都是依赖于孔隙、基质在三维空间的连通、扭曲和异质性,而团聚体本身仅为与固体颗粒相关的数据,并不能客观反映真实的土壤结构特征。实际上,与团聚体相关的土壤结构的研究应属于狭义土壤结构的范畴^[10,11]。

土壤是由固、液、气三相物质组成的一种介于固体和液体之间的颗粒性半无限介质,三相之间既是相互联系、相互转化、相互制约、不可分割的有机整体,也是构成土壤肥力的物质基础。三相比的变化决定土壤结构的差异,进而影响土壤功能与肥力水平,土壤结构功能最终也将通过作物产量和品质反映出来^[12,13]。由此可见,只有把土壤三相作为整体来分析和研究广义土壤结构的特征与变化,才能为客观地切实表征土壤的功能与质量服务。

以往通过土壤三相比来说明土壤物理性状的研究中,尽管有广义土壤结构的意识,但并没有给出一个量化综合指标来反映因外应力作用而引起土壤结构发生变化的程度,缺乏统一的标准来评价、比较不同状态下土壤结构的优劣^[14,15]。为此,本文借鉴微观经济学中柯布-道格拉斯生产函数边际递减效益的思想,基于土壤三相构建了一个在旱作土壤条件下,土壤三相“投入”与土壤结构“产出”的土壤结构生产函数,即广义土壤结构指数(generalized soil structure index, *GSSI*);同时在土壤三相直观的二维三系图中计算出土壤三相结构距离(soil three-phase structure distance, *STPSD*),以期作为描述土壤结构的综合指标,为量化研究土壤结构、功能与质量提供参考。

1 函数的选择与构建

微观经济学中的生产函数是指生产要素投入与产出的一种数学表达方式。该函数的成立有如下假设:(1)所有的生产要素投入量不得为负;(2)产出量不得小于零;(3)生产函数为一单调连续函数,存在一阶导数^[16]。将土壤三相的体积百分含量视为3个生产要素,在特殊干旱或压实条件下,液相和气相可以取到最小值零,但三相均不能为负,据此建立土壤介质中“投入”与“产出”的生产函数,完全符合以上假设条件。

根据投入要素的可变性,生产分为短期生产和长期生产。长期生产发生在所有生产要素均可改变的时期,在此期间建立的生产函数称为长期生产函数。土壤三相可以因自然条件、生物活动、土壤管理措施的改变而发生极大变化,具有高度变动性,这与经济学中的长期生产相似^[2]。因此,所构建的土壤三相“投入”与土壤结构“产出”关系符合长期生产函数的基本特征^[16]。

柯布-道格拉斯生产函数(简称 c-d 函数)是最经典的长期生产函数之一^[17],推广的 c-d 函数模型可表示为:

$$q = A \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

式中, $A > 0$, $0 < \alpha_i < 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

c-d 函数的成立必然存在两个互为相关、又不完全一致的制约假设,即边际产量递减和边际技术替代率递减。前者指当其他要素投入不变时,每增加一个单位的投入所带来的定量增量呈递减趋势;后者指当产出量不变时,随着某一要素投入的增加,它所能替代的另一个要素数量呈递减态势^[16~18]。这两个假设反映了土壤三相之间相互联系、相互制约的本质。因此,借鉴柯布-道格拉斯生产函数边际递减效益的思想可以构建土壤三相“投入”与土壤结构“产出”的函数关系,能够实现土壤结构特征的量化。

柯布-道格拉斯生产函数中 A 是实际生产过程中的效率系数,是不能被各个要素所解释的那一部分,亦被称为“大垃圾箱”^[19]。然而事实上,土壤受各种外力作用后土壤结构的改变都可以通过三相比比例的变化体现出来,所以在构建土壤结构生产函数过程中可以忽略除三相以外的因素的影响,假设 $A = 1$,则存在:

$$GSSI = X_s^{\alpha_s} X_L^{\alpha_L} X_G^{\alpha_G} \quad (2)$$

式中, $GSSI$ 为广义土壤结构指数; X_s 为土壤固相体积百分比(%); X_L 为土壤液相体积百分比(%); X_G 为土壤气相体积百分比(%); $0 < \alpha_s, \alpha_L, \alpha_G < 1$ 。

由于柯布-道格拉斯生产函数没有最大值,而土壤却存在发挥最佳功能的理想结构,因此需对式(2)进行

调整。通常情况下,旱作土壤的理想三相体积百分比分别是固相 50%,液相和气相各占 25%^[20, 21],可以认为土壤结构最优时函数取得最大值,设为 100,其它状态下土壤结构生产函数的“产量”均小于 100。因此假设在 $\alpha_s = \alpha_L = \alpha_G$ 的条件下,当且仅当 $X_s = 50, X_L = 25, X_G = 25$ 时, $GSSI$ 存在最大值,故将函数的第一项 X_s 调整为 $(X_s - 25)$,即:

$$GSSI = [(X_s - 25) X_L X_G]^\alpha \quad (3)$$

将理想三相比例体积百分比及最大值代入(3),得出参数 $\alpha = 0.4769$ 。最终得出旱作土壤生产函数为:

$$GSSI = [(X_s - 25) X_L X_G]^{0.4769} \quad (4)$$

式中, $GSSI$ 为广义土壤结构指数; X_s 为土壤固相体积百分比(%), >25 ; X_L 为土壤液相体积百分比(%), >0 ; X_G 为土壤气相体积百分比(%), >0 。

2 函数的应用及检验

应用所建立的旱作土壤生产函数,对典型黑土区——黑龙江省克山农场(土壤类型为粘化湿润均腐土^[22],质地为粘壤土)2006 年 10 月大机械深松作业前、后的马铃薯耕地的耕作区($\leq 40\text{cm}$)与非耕作区($41 \sim 80\text{cm}$)土壤三相比的测定结果进行了广义土壤结构指数的计算,结果证明了广义土壤结构指数能够有效地综合反映土壤结构的变化。

表 1 深松前后广义土壤结构指数及土壤结构距离的变化
Table 1 $GSSI$ and $STPSD$ calculated before and after subsoiling

处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)	固相体积百分比 Solid phase Proportion (%)	液相体积百分比 Liquid phase proportion (%)	气相体积百分比 Gas phase proportion (%)	结构指数 GSSI	结构距离 STPSD
深松前 Before subsoiling	≤ 40	62.26	32.37	5.37	65.68	17.18
	41 ~ 80	55.84	40.01	4.15	58.74	18.63
深松后 After subsoiling	≤ 40	55.66	18.02	26.33	96.63	6.43
	41 ~ 80	67.91	29.23	2.86	49.57	20.36

由表 1 可以看出,表层耕作区的广义土壤结构指数均高于下层非耕作区,可以明确的反映出表层耕作区比下层非耕作区具有相对良好的土壤结构。机械深松作业后耕作区的广义土壤结构指数由 65.68 增加到 96.63,表明机械深松作业对上层耕作区土壤结构具有明显的改善作用;下层非耕作区广义土壤结构指数却由 58.74 降低到 49.57,表现出受机械压实累积效应的影响导致土壤结构进一步退化。这与已有研究的结论相吻合^[23, 24]。

与以往采用土壤三相比的比较分析来研究土壤物理性状与结构相比,广义土壤结构指数的应用能够便捷、有效地综合判断和定量评价土壤三相结构的变化程度。在此基础上,结合土壤三相分析的“二维三系图”可以更直观地了解土壤三相状态及其土壤结构的动态趋势变化。在“二维三系图”中,土壤三相向理想结构点逼近或远离的趋势可以通过各个状态下土壤三相点到理想三相结构点的距离,即“土壤三相结构距离”(STPSD)来定量化表达,即:

$$STPSE = \sqrt{(X_s - 50)^2 + (X_s - 50)(X_L - 25) + (X_L - 25)^2}$$

$$\text{或} \quad STPSE = \sqrt{(X_s - 50)^2 + (X_s - 50)(X_G - 25) + (X_G - 25)^2}$$

$$\text{或} \quad STPSE = \sqrt{(X_L - 25)^2 + (X_L - 25)(X_G - 25) + (X_G - 25)^2}$$

结合图 1 和表 1 的分析可以看出,机械深松作业后,表层耕作区土壤通过固相和液相比比例的减少、气相比比例的大幅度增加实现向理想三相结构逼近,土壤三相结构距离从 17、18 显著减少到 6.43,表现出明显改善土壤结构的趋势;与表层耕作区不同,下层非耕作区土壤结构的变化表现出固相比比例增加、液相和气相比比例减少的特点,土壤三相结构距离从 18.63 增加到 21.36,表现出土壤结构进一步退化、土壤三相远离理想状态的趋势。这与广义土壤结构指数的分析结论是一致的。

运用 2006 ~ 2007 年黑龙江省克山农场旱作马铃薯耕地土壤剖面 0 ~ 80cm 范围内,由环刀法取得的 281 组土壤三相比的测定数据,计算了广义土壤结构指数与土壤三相结构距离,并对获得的计算结果进行标准化残差分析,确定所选择的样本符合正态分布。在此基础上,通过拟合发现广义土壤结构指数 (GSSI) 与土壤三相结构距离 (STPSD) 具有极显著线性关系, $Y = -3.65x + 123.34$, $R^2 = 0.86^{**}$ ($P < 0.01$), 拟合结果可信。进一步证明了广义土壤结构指数与土壤结构距离均可以作为定量描述土壤结构变化的指标 (图 2, 图 3)。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 借鉴柯布-道格拉斯生产函数边际递减效益的思想,首次构建了旱作土壤介质中“三相投入”与“结构产出”的土壤结构生产函数,即:广义土壤结构指数:

$$GSSI = [(X_s - 25)X_LX_G]^{0.4769}$$

式中, GSSI 为广义土壤结构指数; X_s 为土壤固相体积百分比 (%), > 25 ; X_L 为土壤液相体积百分比 (%), > 0 ; X_G 为土壤气相体积百分比 (%), > 0 , 用于量化研究、分析和综合评价土壤结构状态与变化动态。

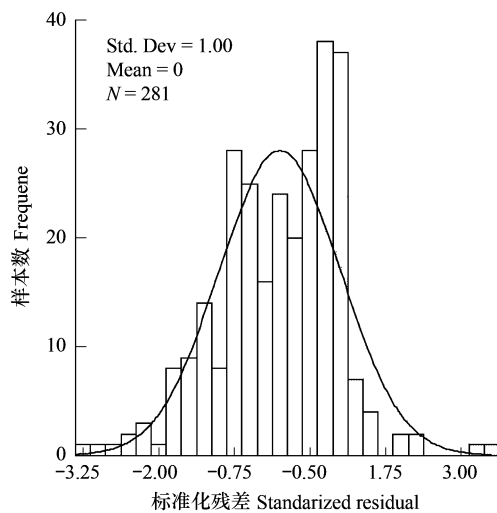


图2 标准化残差直方图

Fig. 2 Standardized residual histogram

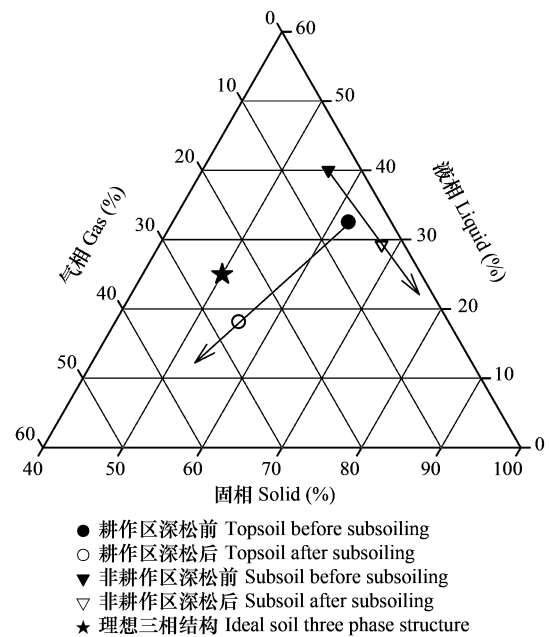


图1 机械深松前后土壤三相的变化

Fig. 1 The effect of machinery subsoiling on soil three phases

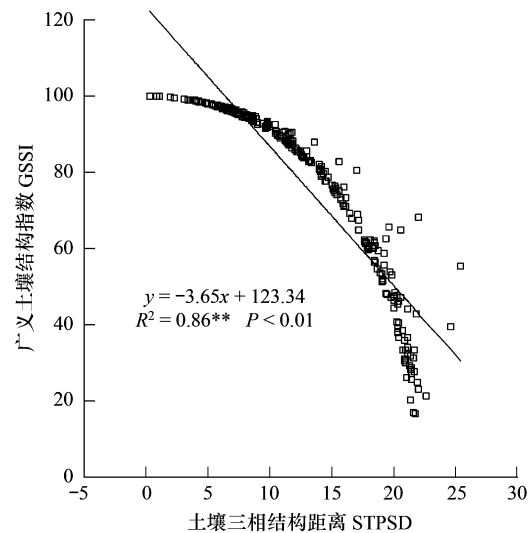


图3 广义土壤结构指数与土壤三相结构距离的拟合关系

Fig. 3 Linear fitting for GSSI and STPSD

(2) 在“二维三系图”中,土壤三相向理想结构点逼近或远离的趋势可以通过各个状态下土壤三相点到理想三相结构点的距离,即土壤三相结构距离 (STPSD) 来形象地量化表达。并以此验证了应用广义土壤结构指数反映土壤结构及其动态是有效的、可信的。

(3) 广义土壤结构指数 (Y) 与土壤三相结构距离 (x) 具有极显著线性关系, $Y = -3.65x + 123.34$, 拟合程度较高, $R^2 = 0.86^{**}$ ($P < 0.01$)。据此,认为二者均可作为定量描述土壤结构及变化的指标。

3.2 讨论

(1) 文中提出的广义土壤结构指数与土壤三相结构距离均是以旱作农业土壤为背景,并基于理想三相结

构建立出来的,所以只要已知不同利用类型土壤的理想三相比,例如,水田、林地等等,就可以将函数进一步推广,得出相应的广义土壤结构指数和结构距离,进而为定量评价土壤结构功能服务。

(2) 土壤生产函数的建立只是基于土壤三相比比例的整体分配情况,没有深入考虑固、液、气三相各自的性质,例如固体颗粒的粒级大小与排列、液相饱和程度、气相中有效气体的含量等。因此在以后的研究中可以从三相各自特征与土壤三相整体特征相结合的角度探讨其综合效益对土壤结构、土壤功能的影响,修订模型参数 A 值,不断改进土壤生产函数,使广义土壤结构指数和土壤三相结构距离更加完善,具有更为广泛的应用前景。

References:

- [1] Zheng Y, Zhang F S. Effects of soil structure and tillage on the rhizospheric micro-ecosystem. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2003, 18(2):193—197.
- [2] Qin Y D. *Soil physics*. Beijing: Higher Education Press, 2003. 10—16.
- [3] Diaz-Zorita M, Perfect E, Grove J H. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(1/2): 3—22.
- [4] Perret J P, Prashar S O, Kansas A, *et al.* Preferential flow in intact soil columns measured by SPECT scanning. *Soil Soc. Soc. Am. J.*, 2000, 64:469—477.
- [5] Luiz F P, Osny O S, Klaus R. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting-drying soil structure changes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2005, 229(3/4): 443—456.
- [6] Huabei L, Erxiang S, Hoe I L. Constitutive modeling of soil-structure interface through the concept of critical state soil mechanics. *Mechanics Research Communications*, 2006, 33(4): 515—531.
- [7] He X B, Feng H, Feng Z D. 3D imaging of soil microstructure using synchrotron x-ray computed microtomography. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(12): 328—330.
- [8] Li D C, Velde B J, Deleru F, *et al.* Image analysis of development of cultivated soil structure under non-tillage system. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 214—220.
- [9] Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 364—372.
- [10] Yong I M, Crawford J W, Rappoldt C. New methods and models for characterizing structure heterogeneity of soil. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61(1/2): 33—45.
- [11] Letey J. The study of soil structure: science or art. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6): 699—707.
- [12] Zeng D C. *Mechanical soil dynamics*. Beijing: Science and Technique Press, 1995. 108—115.
- [13] Zhang X B, Shangguan Z P. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3685—3695.
- [14] Hu X Y, Zhang J M, Jiang H, *et al.* Study on the physical properties of tea soil in Northeast of Hubei Province. *Journal of Tea*, 2004, 30(3): 150—152.
- [15] Gao Y S, Zhu Z Y, Bi Y L, *et al.* Researches on application of gypsum for the improvement of soda saline and alkaline soil. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2003, 28, (6): 26—31.
- [16] Wang Q S. *Principles of microeconomics*. Beijing: Economic Management Press, 2001. 183—196.
- [17] Gu X L. Matching of econometric models with data and Cobb-Douglas production function. *China Rural Survey*, 2007, (1): 2—10, 23.
- [18] Xie W A. *The theories and measurements of microeconomics*. Shanghai: Tongji University Press, 1996. 135—177.
- [19] Dong X H, Li S. A improved model of C-D production function. *Popular Science and Technology*, 2004, (10): 17—19.
- [20] Brandy N C, Weil R R. *The nature and properties of soils*. New Jersey: Pearson Education Inc., 2002. 17—29.
- [21] Zhang X Y, Sui Y Y. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(6): 122—125.
- [22] Gong Z T. *Classification system of china soil: theories, methods and practice*. Beijing: Science Press, 1999. 474—479.
- [23] Wang E H, Chen X W. Effect of heavy machinery operation on soil three phases and available nutrient in phaeozem region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 98—102.
- [24] Hakansson I, Reeder R C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 1994, 29(2/3): 277—304.

参考文献:

- [1] 郑毅,张福锁. 土壤结构和耕作对根际微生态系统的影响. 云南农业大学学报,2003,18(2):193~197.
- [2] 秦耀东. 土壤物理学. 北京:高等教育出版社,2003. 10~16.
- [7] 贺秀斌,冯桓,冯兆东. 土壤显微结构的X光-同步加速器计算机三维图像透视技术. 土壤学报,2005,42(12):328~330.
- [8] 李德成, Velde B J, Deleru F, 等. 免耕制度下耕作土壤结构演化的数字图像分析. 土壤学报,2002,39(2):214~220.
- [9] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布. 生态学报,2006,26(2):364~372.
- [12] 曾德超. 机械土壤动力学. 北京:科学技术出版社,1995. 108~115.
- [13] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. 生态学报,2006,26(11):3685~3695.
- [14] 胡学玉,张继铭,江洪,等. 鄂东(北)茶园土壤物理环境分析. 茶叶,2004,30:(3):150~152.
- [15] 高玉山,朱知运,毕业莉,等. 石膏改良苏打盐碱土田间定位试验研究. 吉林农业科学,2003,28,(6):26~31.
- [16] 王秋实. 微观经济学原理. 北京:经济管理出版社,2001. 183~196.
- [17] 顾秀林. 经济学数量模型的选择与科布-道格拉斯生产函数. 中国农村观察,2007,(1):2~10,23.
- [18] 谢为安. 微观经济理论与计量方法. 上海:同济大学出版社,1996. 135~177.
- [19] 董祥海,李升. C-D 生产函数的一种改进模型. 研究与探索,2004,(10):17~19.
- [21] 张兴义,隋跃宇. 农田土壤机械压实研究进展. 农业机械学报,2005,36(6):122~125.
- [22] 龚子同. 中国土壤系统分类:理论、方法、实践. 北京:科学出版社,1999. 474~479.
- [23] 王恩垣,陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤三相比与速效养分的影响. 水土保持学报,2007,21(4):98~102.