

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.032

腐熟污泥施用对土壤有机-无机碳组分的影响

常会庆 王启震 吴杰 陈鲜妮

(河南科技大学农学院, 洛阳 471023)

摘要: 为探明腐熟污泥施用对两种不同酸碱性土壤有机碳、无机碳组分的影响,明确无机碳与有机碳及土壤酸碱性的关系,通过连续两年的盆栽试验,开展小麦-玉米轮作模式下碱性壤土和酸性砂土污泥农用的研究。结果表明:添加腐熟污泥后,随污泥添加量的增加,两种土壤的有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)和腐殖质碳(HSC)等有机碳组分含量呈增加趋势。与对照(CK)相比,当污泥添加量为75 t/hm²时,酸性砂土有机碳组分SOC、ROC、DOC、HSC含量分别增加了82.39%、25.62%、158.33%和30.77% ($P < 0.05$);在碱性壤土中,上述有机碳组分分别增加了84.36%、49.26%、340.00%和354.90% ($P < 0.05$),且两种土壤中各有机碳组分之间呈现极显著的正相关关系($P < 0.01$)。施用污泥降低了碱性壤土中ROC的分配比例(污泥施用量为3.75 t/hm²时除外),但增加了DOC和HSC的分配比例;污泥农用降低了酸性砂土ROC和HSC的分配比例,但增加了DOC的分配比例。在碱性壤土中污泥农用降低了土壤无机碳(SIC)、活性无机碳(AIC)含量,同时土壤pH值降低;而在酸性砂土中污泥农用,土壤的SIC、AIC含量增加,同时土壤pH值增大;两种土壤的SIC和pH值之间均呈现极显著的正相关关系($P < 0.01$)。本研究可为不同酸碱性土壤碳库质量管理提供科学依据。

关键词: 腐熟污泥; 碱性壤土; 酸性砂土; 有机碳; 无机碳

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)08-0295-08 OSID: 

Effects of Agricultural Application of Composted Sludge on Organic – Inorganic Carbon Components

CHANG Huiqing WANG Qizhen WU Jie CHEN Xianni

(School of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The agricultural use of composted sludge is an effective way to solve the problem of sludge recycling. Because sludge is rich in organic matter, agricultural use of sludge will affect the quality of soil carbon pool. In order to clarify the effects of sludge application on carbon components of two kinds of soils with different pH values, the effect of sludge application on soil organic, inorganic carbon components and soil acidity were determined, and the relationship between soil inorganic carbon and organic carbon and soil pH value was explored. Under the wheat-maize rotation mode, two consecutive years experiment was carried out, four sludge addition amounts were 3.75 t/hm², 7.5 t/hm², 37.5 t/hm² and 75 t/hm², respectively, and one blank control was provided, which were marked as H1, H2, H3, H4 and CK, respectively. The main conclusions were as follows: the organic carbon components content such as soil organic carbon (SOC), readily oxidizable carbon (ROC), dissolved organic carbon (DOC) and humus carbon (HSC) were increased with the increase of sludge addition. Compared with CK, the SOC, ROC, DOC and HSC of acidic sandy soil were increased by 82.39%, 25.62%, 158.33% and 30.77%, respectively, when the sludge addition was 75 t/hm² ($P < 0.05$); the corresponding values were 84.36%, 49.26%, 340.00% and 354.90% in alkaline loam ($P < 0.05$), and there was a very significant positive correlation among the organic carbon components in two kinds of soils ($P < 0.01$). The application of sludge reduced the ROC distribution ratio (except when the amount of sludge was 3.75 t/hm²), but increased the distribution ratio of DOC and HSC. However, the proportion of ROC and HSC was decreased, but the proportion of DOC was increased in acidic sandy soil. In addition, the content of soil inorganic carbon (SIC), active inorganic carbon (AIC) and pH value in alkaline loam

were reduced due to application of sludge, and the pH value of soil was also reduced; however, AIC and pH value were increased in acidic sandy soil. There was a significant positive correlation between SIC and pH value of two kinds of soils ($P<0.01$). It can be concluded that application of composted sludge can produce different carbon effects on different acid-base soils. Therefore, sludge can be used in production practice to cultivate fertilizer or regulate the change of carbon pool quality in soil, and the acidification phenomenon of acid soil can be changed by adding composted sludge.

Key words: composted sludge; alkaline loam; acidic sandy soil; organic carbon; inorganic carbon

0 引言

土壤中有有机碳、无机碳组分是土壤的重要组成部分,土壤有机碳不仅是植物重要的养分来源,还可为土壤中动物和微生物的生长发育提供能源^[1],在调节土壤环境、改善土壤结构及减少环境负面影响等方面发挥了重要作用^[2-4]。因存在方式和化学性质不同,土壤不同组分有机碳的生物有效性和肥力功能存在差异,能反映不同的稳定机制^[5]。因此,通常按照种类、活性、形态等方式把有机碳分为不同的类型^[6-8],其中土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、易氧化有机碳(Readily oxidizable carbon, ROC)、可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和腐殖质碳(Humus carbon, HSC)是上述类型的典型碳组分。土壤无机碳(Soil inorganic carbon, SIC)主要是指土壤风化成土过程中形成的发生性碳酸盐矿物态碳^[9],其含量变化是判断土壤形成、发生与分类的重要指标^[10],也是影响土壤 pH 值、供肥能力及土壤环境质量的主要因素^[11]。土壤活性无机碳(Active inorganic carbon, AIC)为土壤中未与土壤粘粒部分紧密结合、易发生化学反应的碳酸盐,是土壤碳酸盐反应的指标,其含量变化同样在评价土壤质量方面具有重要作用^[12]。因此,土壤碳组分特征变化,尤其是外源有机物农用对土壤有机碳、无机碳组分的影响值得研究^[13]。

目前,添加或配施不同类型有机物料对单一土壤有机碳产生的影响已有不少报道。例如,在小麦-玉米种植模式下,秸秆直接还田、秸秆转化为食用菌基质出蘑后菌渣还田和秸秆过腹还田 3 种秸秆还田模式的碱性土壤中有有机碳质量分数分别增加 9.0%、23.9% 和 26.7%,同时也提高了土壤溶解性有机碳、微生物量碳和易氧化态碳等活性碳组分含量^[14]。稻田中化肥和生物碳、玉米秸秆、鲜牛粪或松针配施下,土壤微生物量碳、可溶性有机碳显著大于不施肥处理和单施化肥处理^[15]。可见,土壤中有有机物料的添加有利于不同有机碳组分的增加。

污泥作为一种有机物料,其无害化处理后农用是有效消纳污泥的方式之一。我国污泥中有机质平均含量一般在 38% 以上^[16],施入无害化污泥可直

接或间接地调控土壤有机质的输入及其转化^[17],施用污泥对土壤有机碳组分的提升作用已得到证实^[18-20]。我国土壤类型多样,土壤性质差异较大,污泥施用对不同酸碱性土壤有机碳的影响差异,尤其对土壤中无机碳组分及 pH 值的影响尚缺乏研究,而这些问题正是污泥改良酸碱性土壤质量的重要依据。为此,本研究以典型的碱性潮土(碱性壤土)和酸性黄棕壤(酸性砂土)为研究对象,通过连续两年施用不同量的腐熟污泥,探究污泥添加对上述土壤有机碳、无机碳组分的影响,旨在为土壤的污泥资源化农用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试污泥

供试无害化污泥取自洛阳市某污泥处理厂,该污泥为经过好氧高温堆肥后制备而成的腐熟污泥,污泥基本指标为:有机质质量分数 42.28%、无机碳质量分数 6.20%、pH 值 7.75、全氮质量比 20.24 g/kg、全磷质量比 15.23 g/kg、全钾质量比 5.40 g/kg。所选污泥重金属含量符合《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284—2018)所规定的值(镉、汞、铅、铬、砷质量比分别小于 3、3、300、500、30 mg/kg)。

1.2 试验地点

试验在河南科技大学农场开展,该农场位于河南省洛阳市(34°41'N,112°27'E),地处温带大陆性季风气候,年均气温 12.2~24.6℃,无霜期 210 d 以上,年降水量、日照时数和年均相对湿度分别为:528~800 mm、2 200~2 300 h、60%~70%。

1.3 试验设计

供试碱性壤土和酸性砂土分别取自河南省洛阳市的碱性潮土和驻马店市的酸性黄棕壤,两种土壤的基本理化性质如表 1 所示。将上述大田表层土壤风干后过 2 mm 筛(除去杂草、砂砾等物质),取 10 kg 过筛土壤放置于高 40 cm、直径 30 cm 的塑料盆钵中。根据不同污泥施用量,试验设置的 5 个处理分别为 0、3.75、7.5、37.5、75 t/hm²(按照每公顷大田表层土质量为 2.25×10⁶ kg 折算),编号分别为 CK、H1、H2、H3、H4。盆栽试验于 2015 年 10 月 10 日播种小麦,2016 年 6 月 1 日收获小麦后种植玉

米,玉米收获时间为 2016 年 10 月 8 日,连续轮作两年。供试小麦、玉米品种分别为豫农 035、郑单 958,仅在小麦季添加污泥,并且每盆施加尿素 2.60 g,过磷酸钙 4.2 g,氯化钾 1.3 g,施入的肥料与污泥、土壤均匀混合,每盆种植小麦 10 株、玉米 1 株。每个处理重复 3 次,随机排列在温室中。

表 1 供试两种土壤的基本理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of two kinds of soil

土壤类型	有机质质量 分数/%	全氮质量 分数/%	全磷质量 分数/%	全钾质量 分数/%	pH 值	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)
碱性壤土	0.75	0.49	0.72	1.84	7.63	30.23	15.32
酸性砂土	0.54	0.46	0.85	1.26	5.53	12.54	24.35

1.4 样品采集与分析

土壤样品于 2017 年 10 月 8 日玉米收获后采集,采集的土壤样品风干后分别过 0.85、0.15 mm 土筛备用。土壤 pH 值、土壤有机碳含量、溶解性有机碳含量、无机碳含量等指标参照《土壤农化分析》^[21]方法测定。土壤易氧化有机碳(ROC)含量:取 0.85 mm 风干土样 2 g 于 150 mL 锥形瓶中,准确加入 25 mL 333 mmol/L 的高锰酸钾溶液,100 r/min 振荡 1 h 后,在离心机上 2 000 r/min 离心 5 min,取上清液用去离子水以 1:250 的比例稀释,在分光光度计上以 565 nm 波长比色,并计算土壤易氧化有机碳含量^[22]。土壤活性碳酸盐(AIC)含量:称取 2 g 过 0.85 mm 筛的风干土样,置于 50 mL 离心管中,加入 25 mL 0.1 mol/L pH 值为 9 的(NH₄)₂C₂O₄,200 r/min 振荡 2 h 后,立即 3 000 r/min 离心 20 min,转移 10 mL 悬浮液于 150 mL 三角瓶中,加入 3 mol/L H₂SO₄溶液 5 mL,用 80℃ 水浴锅进行升温,趁热用 0.02 mol/L K₂MnO₄溶液滴定,并计算土壤活性碳酸钙含量。

各有机碳的分配比例为不同有机碳组分占土壤有机碳(SOC)百分比。

1.5 数据处理与分析

利用 Excel 软件进行数据处理,采用 SPSS 17.0

软件进行数据方差分析和相关性分析,不同处理间采用最小显著差数法(LSD)进行差异显著性检验($P<0.05$),采用 OriginPro 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 污泥添加对土壤有机碳组分的影响

污泥添加后两种土壤的 SOC、ROC、DOC 和 HSC 等有机碳组分变化见表 2。随着腐熟污泥施加量的增加,两种土壤中各有机碳组分含量随污泥施用量的增加呈上升趋势。与 CK 相比,酸性砂土和碱性壤土中 H2、H3、H4 处理的 SOC 含量均显著增加,两种土壤的增加范围分别为 31.89%~82.39% 和 25.83%~84.36% ($P<0.05$)。在碱性壤土中,当污泥施用量大于等于 3.75 t/hm²时,土壤中 ROC 和 DOC 含量均显著高于 CK 处理,其增幅为 24.26%~49.26% 和 130.00%~340.00% ($P<0.05$),而在酸性砂土中污泥施用量大于等于 7.5 t/hm²时,上述两种有机碳分别显著增加了 16.53%~25.62% 和 58.33%~158.33% ($P<0.05$)。与 CK 相比,酸性砂土添加污泥后,H3、H4 处理的 HSC 含量分别显著增加了 23.08% 和 30.77% ($P<0.05$),而碱性壤土 H2、H3、H4 处理的 HSC 含量分别显著增加 39.22%、215.69% 和 354.90% ($P<0.05$)。

表 2 土壤中有有机碳组分质量比

Tab.2 Contents of organic carbon components in soil

处理	SOC		ROC		DOC		HSC	
	酸性砂土	碱性壤土	酸性砂土	碱性壤土	酸性砂土	碱性壤土	酸性砂土	碱性壤土
CK	(3.01 ± 0.13) ^d	(4.22 ± 0.21) ^d	(2.42 ± 0.03) ^c	(2.72 ± 0.31) ^c	(0.012 ± 0.001) ^d	(0.010 ± 0.001) ^d	(0.52 ± 0.02) ^c	(0.51 ± 0.01) ^d
	(3.37 ± 0.27) ^{cd}	(4.47 ± 0.65) ^d	(2.46 ± 0.03) ^c	(3.38 ± 0.01) ^b	(0.015 ± 0.001) ^{cd}	(0.023 ± 0.006) ^c	(0.57 ± 0.01) ^c	(0.56 ± 0.05) ^d
H1	(3.97 ± 0.27) ^c	(5.31 ± 0.89) ^c	(2.82 ± 0.06) ^b	(3.42 ± 0.24) ^b	(0.019 ± 0.001) ^c	(0.031 ± 0.003) ^b	(0.59 ± 0.01) ^c	(0.71 ± 0.03) ^c
	(4.85 ± 0.24) ^b	(6.53 ± 0.38) ^b	(2.91 ± 0.11) ^{ab}	(3.58 ± 0.36) ^{ab}	(0.024 ± 0.002) ^b	(0.037 ± 0.004) ^b	(0.64 ± 0.02) ^b	(1.61 ± 0.07) ^b
H2	(5.49 ± 0.43) ^a	(7.78 ± 0.33) ^a	(3.04 ± 0.09) ^a	(4.06 ± 0.23) ^a	(0.031 ± 0.003) ^a	(0.044 ± 0.005) ^a	(0.68 ± 0.01) ^a	(2.32 ± 0.14) ^a
H3								
H4								

注:同一列不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$),下同。

两种土壤各有机碳组分含量由大到小依次为 SOC、ROC、HSC、DOC。

2.2 土壤有机碳组分之间的相关性及分配比例

两种土壤中 SOC、ROC、DOC 和 HSC 之间均呈极显著正相关关系(表 3),说明各有机组分间存在明显的依存关系。添加污泥不但影响土壤中各有机碳组分含量,还会影响其分配比例,土壤各有机碳组分占土壤 SOC 的分配比例,更能体现有机物添加引起土壤质量的变化^[23-24]。对于碱性壤土而言,随着污泥施用量的增加,各处理 ROC 的分配比例降低(H1 处理除外)(表 4)。各添加污泥处理的 DOC 分配比例较 CK 显著增加($P<0.05$),但它们之间差异不显著;H3、H4 处理的 HSC 分配比例较 CK 显著增加($P<0.05$)。与 CK 处理相比,酸性砂土 H3、H4 处理的 ROC 分配比例显著降低($P<0.05$);污泥添加增加了 DOC 的分配比例,但降低了 HSC 的分配比例,H4 处理的 DOC 分配比例较 CK 显著增加了 39.02% ($P<0.05$);H3、H4 处理的 HSC 分配比例较 CK 显著下降了 23.26% 和 27.91% ($P<0.05$)。

表 3 两种土壤各有机碳组分间的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of organic carbon components in two kinds of soil					
土壤类型	组分	SOC	ROC	DOC	HSC
碱性壤土	SOC	1	0.725 **	0.896 **	0.950 **
	ROC		1	0.872 **	0.720 **
	DOC			1	0.812 **
	HSC				1
酸性砂土	SOC	1	0.920 **	0.938 **	0.922 **
	ROC		1	0.858 **	0.890 **
	DOC			1	0.909 **
	HSC				1

注:**表示 $P<0.01$ 水平上差异显著。

表 5 两种土壤无机碳组分质量比

Tab.5 Contents of inorganic carbon components in two kinds of soil							g/kg
土壤类型	指标	CK	H1	H2	H3	H4	
碱性壤土	无机碳质量比	(40.80 ± 1.17) ^a	(38.33 ± 1.23) ^{ab}	(37.98 ± 0.69) ^b	(36.39 ± 0.67) ^b	(36.02 ± 0.36) ^b	
	活性无机碳质量比	(22.86 ± 2.03) ^a	(22.04 ± 0.29) ^a	(21.63 ± 0.92) ^a	(20.42 ± 1.02) ^a	(18.81 ± 1.45) ^a	
酸性砂土	无机碳质量比	(4.72 ± 0.49) ^c	(5.80 ± 0.59) ^{bc}	(5.87 ± 0.16) ^{bc}	(7.00 ± 0.20) ^{ab}	(7.38 ± 0.36) ^a	
	活性无机碳质量比	(3.25 ± 0.03) ^c	(3.32 ± 0.02) ^c	(3.44 ± 0.03) ^b	(3.54 ± 0.06) ^b	(3.69 ± 0.005) ^a	

注:同一行不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

加($P<0.05$)。两种土壤中 SIC 和 AIC 之间均存在正相关关系(图 1),其中碱性壤土决定系数为 0.53 ($P<0.05$),而酸性砂土决定系数为 0.76 ($P<0.01$)。

2.4 污泥添加对土壤 pH 值的影响及土壤无机碳与 pH 值、有机碳的关系

随着污泥施用量的增加,碱性壤土 pH 值呈现

表 4 两种土壤各有机碳组分的分配比例

Tab.4 Distribution ratio of organic carbon components in two kinds of soil					%
土壤类型	处理	ROC	DOC	HSC	
碱性壤土	CK	(64.79 ± 8.10) ^{ab}	(0.24 ± 0.03) ^b	(12.21 ± 0.61) ^c	
		(73.05 ± 8.15) ^a	(0.50 ± 0.05) ^a	(12.68 ± 2.28) ^c	
	H1	(64.43 ± 4.59) ^{ab}	(0.58 ± 0.04) ^a	(13.35 ± 0.37) ^c	
		(55.21 ± 7.21) ^{ab}	(0.56 ± 0.05) ^a	(24.79 ± 1.38) ^b	
	H2	(52.32 ± 4.37) ^b	(0.57 ± 0.07) ^a	(29.84 ± 0.56) ^a	
		(80.66 ± 3.58) ^a	(0.41 ± 0.06) ^b	(17.21 ± 1.09) ^a	
	H3	(73.49 ± 6.10) ^a	(0.44 ± 0.02) ^b	(17.10 ± 1.34) ^a	
		(71.26 ± 6.40) ^a	(0.47 ± 0.03) ^{ab}	(14.99 ± 0.87) ^{ab}	
酸性砂土	CK	(60.05 ± 2.34) ^b	(0.50 ± 0.07) ^{ab}	(13.20 ± 0.37) ^{bc}	
		(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	
	H1	(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	
		(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	
	H2	(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	
		(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	
	H3	(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	
		(55.51 ± 3.19) ^b	(0.57 ± 0.04) ^a	(12.42 ± 0.99) ^c	

2.3 污泥添加对土壤无机碳组分的影响

腐熟污泥添加对两种土壤无机碳组分的影响见表 5。碱性壤土中腐熟污泥的施用,使得土壤中无机碳(SIC)和活性无机碳(AIC)含量均降低;而酸性砂土中腐熟污泥的施用提高了土壤中的 SIC 和 AIC 含量。与 CK 相比,碱性壤土 H2、H3、H4 处理的 SIC 含量均显著降低($P<0.05$),但污泥添加并没有显著降低各处理的 AIC 含量。与 CK 相比,酸性砂土 H3、H4 处理土壤中的 SIC 含量显著增加了 48.31% 和 56.36%,H2、H3、H4 处理的 AIC 含量也显著增

下降趋势,而酸性砂土 pH 值呈上升趋势(图 2,图中不同小写字母表示处理间差异显著, $P<0.05$)。各添加污泥处理较 CK 显著增加了酸性砂土的 pH 值,增幅为 0.32~0.91 ($P<0.05$);碱性壤土添加污泥的各处理与 CK 相比均显著降低了土壤 pH 值,下降幅度为 0.19~0.39 ($P<0.05$)。可见,随着污泥施用量的增加,会使两种土壤的 pH 值趋向中性发展。

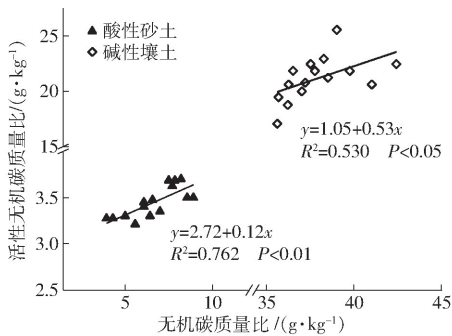


图1 无机碳质量比和活性无机碳质量比的关系

Fig.1 Relationship between soil inorganic carbon and active inorganic carbon

在污泥施用量相同的条件下,碱性壤土 pH 值降幅均低于酸性砂土 pH 值的增幅。研究表明土壤中 SIC 与 pH 值之间存在一定的关系^[25],污泥添加后土壤 SIC 和 pH 值的相关性分析表明,碱性壤土和酸性砂土 SIC 和 pH 值之间均存在极显著正相关关系($P < 0.01$)(图3)。土壤中 SOC 和 SIC 之间存在一定的相关作用^[26]。本研究,污泥添加影响了土壤中 SOC 和 SIC 变化,但它们在两种土壤中的相关关系存在差异(图4)。碱性壤土中 SOC 和 SIC 之间并没有显著的正相关关系($P > 0.05$),而在酸性砂土中 SOC 和 SIC 之间存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)。

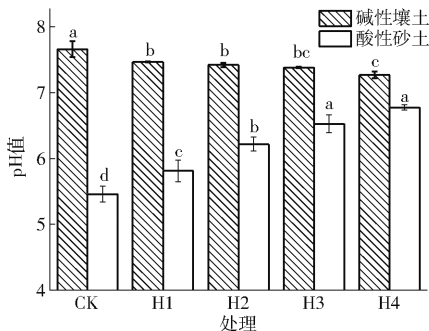


图2 污泥添加对 pH 值的影响

Fig.2 Influence of sludge addition on pH value

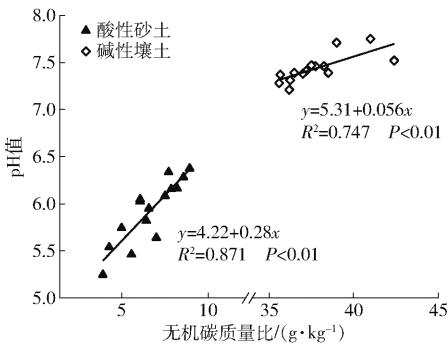


图3 无机碳质量比和 pH 值的关系

Fig.3 Relationship between inorganic carbon and pH value

3 讨论

本研究连续两年在碱性壤土和酸性砂土施用不

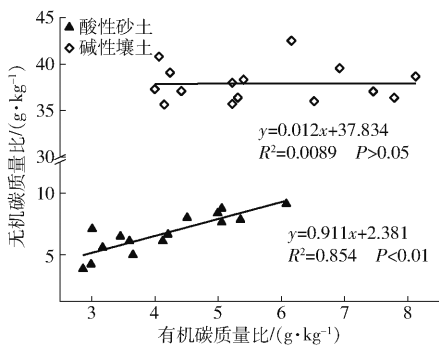


图4 有机碳质量比和无机碳质量比的关系

Fig.4 Relationship between organic carbon and inorganic carbon

同量的腐熟污泥,均增加了土壤不同有机碳组分含量。研究表明,由于腐熟污泥中含有丰富的有机物,因此施加污泥在提高土壤各有机碳组分含量的同时,促进了土壤颗粒对碳的固定^[27-28]。有机肥的增施也表现出类似结果,宋震震等^[29]通过长期定位试验发现,施用有机肥显著增加黑土活性有机碳各组分含量。另外,有机废弃物的施加对促进土壤各种形态腐殖质含量的增加有重要作用^[30-31]。土壤中增加的有机碳可以通过矿化和生物分解等作用产生 CO₂,参与部分碳酸钙的形成或分解,而且不同土壤、气候等条件下有机碳的增加会导致土壤中无机碳向不同方向演变,即通过“SOC ⇌ CO₂ ⇌ SIC”的微碳循环系统发生碳的固定和转移^[32-33]。曾骏等^[34]研究表明,在 pH 值为 8.8 的碱性土壤上长期施用农肥可增加 0~30 cm 土层有机碳含量,但同时减少了土壤中无机碳含量。荣井荣等^[35]长期在灰漠土施用有机肥的结果也表明,0~60 cm 土层土壤无机碳含量随施肥年限的延长先降低后又趋于稳定,而有机碳含量则随施肥年限的延长显著增加。上述研究结果的原因在于有机肥料的施用增加了土壤有机碳含量,经土壤微生物利用后所释放的 CO₂增多,造成土壤中 CO₂分压增大、土壤 pH 值降低,从而引起土壤 CaCO₃含量的减少。本研究在碱性壤土上施用腐熟污泥后,也表现出有机碳增加而无机碳减少现象,原因在于碱性条件下更容易促进土壤溶液中的 CO₂和水作用形成 H₂CO₃,然后通过生产的 H₂CO₃与 CaCO₃反应会导致土壤碳酸钙和 pH 值的下降,该结果也证实了 SOC 对 SIC 的溶蚀具有驱动作用^[36],因此导致在碱性土壤上有机碳和无机碳之间呈现负相关关系。

另一方面,土壤有机肥的施用为无机碳的转移提供了物质基础,并且促进土壤无机碳和有机碳累积的生物化学环境^[37-38]。原因在于,有机肥的施用促进了土壤呼吸和微生物分解量的增加,进而促进

原生碳酸盐风化和大气中 CO₂ 消耗,使原生碳酸盐向次生碳酸盐转化(通常称为无机碳),因此会使土壤无机碳增加,使得土壤有机碳和无机碳之间存在正相关关系^[39-40]。与碱性壤土中腐熟污泥添加后无机碳的变化趋势相反,本研究在酸性砂土中添加腐熟污泥同时增加土壤中的有机碳和无机碳含量,且有机碳和无机碳之间呈现极显著正相关关系。原因在于,酸性砂土中污泥施用增加了土壤中的有机碳含量,有机碳的增加会促进微生物的数量和活性增大,而微生物能够分解有机质产生 CO₂,这部分 CO₂ 和无机碳中来自于土壤母质的碳产生位置替换^[41],促使来自作物残留中的碳或土壤有机碳分解产生的碳渐渐取代土壤母质碳,即原生碳酸盐向次生碳酸盐转化。另外,酸性砂土中腐熟污泥的施用增加了土壤活性无机碳,而增加活性碳的分解使交换性 Ca²⁺ 增加,从而导致土壤盐基饱和度的增大而引起土壤 pH 值的升高,这显然与土壤的复钙(生物的和化学的)作用有关^[33]。可见,腐熟污泥在酸、碱性不同的土壤上连续施用后导致土壤无机碳效应的变化趋势存在差异,碱性壤土上施用污泥趋向于无机碳的溶蚀,而在酸性砂土上施用则会导致原生无机碳向次生碳酸钙转换。根据本试验中腐熟污泥施用对酸碱性不同土壤产生的不同碳效应的结果,在生产实践中,可以利用污泥来培肥或调控土壤中碳库质量的变化,同时可以通过腐熟污泥添加来改善酸性土壤的酸化现象。

土壤中不同有机碳组分占总有机碳含量比例变化与有机物料添加的种类、数量、土壤性质和作物种类等有关^[42],同时受土壤微生物活性变化的影响^[43]。易氧化有机碳分配比例可用于表征土壤有机碳的稳定性,土壤 ROC 分配比例越高,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差,不利于土壤有机质的积累^[44]。本研究中两种土壤的 ROC 分配比例都随污泥施用量增加呈降低的趋势,且在酸性土壤中都低于 CK 处理,说明两种土壤随着腐熟污泥增加,土壤

有机碳的稳定性增加。土壤可溶性有机碳分配比例反映了土壤中最为活跃的碳组分占土壤有机碳的比例,其大小对土壤生物化学反应影响较大^[45],较高的 DOC 分配比例有利于养分分解供作物吸收利用,提高土壤生产力;但较高的 DOC 分配比例将会加大 DOC 随径流流失的风险,降低了土壤有机碳稳定性,不利于土壤碳的稳定^[44]。本研究发现,腐熟污泥农用增加了两种土壤 DOC 分配比例,有利于土壤生产力的提高,该原因与污泥施入土壤后降低土壤对 DOC 的淋溶作用,提高了土壤 DOC 组分含量,从而导致上述有机碳组分相对含量也有所提高有关^[2]。腐殖质碳分配比例直接关系到土壤的肥力性状^[46],腐熟污泥添加到石灰性土壤中,增加了土壤中腐殖质碳分配比例,但在酸性土壤中却表现出相反趋势,这可能与不同酸、碱性土壤类型对腐殖质及活性腐殖质组分碳分配比例影响不同有关^[7]。上述腐熟污泥添加对不同有机碳组分分配比例的影响机制仍需长期田间试验加以验证。

4 结 论

(1)腐熟污泥农用提高了碱性壤土和酸性砂土中 SOC、ROC、DOC 和 HSC 等有机碳组分含量;在碱性壤土中腐熟污泥农用,降低了土壤 pH 值和 SIC、AIC 含量,在酸性砂土中污泥农用,土壤 pH 值和 SIC、AIC 含量增加;两种供试土壤的 SIC 和 pH 值之间均存在极显著正相关关系。

(2)碱性壤土污泥农用降低了 ROC 的分配比例,增加 DOC 和 HSC 的分配比例;酸性砂土污泥施用降低了 ROC 和 HSC 的分配比例,增加了 DOC 的分配比例。两种土壤中各有机碳组分之间都呈现极显著的相关关系。

(3)施用腐熟污泥对不同酸碱性土壤产生的碳效应存在差异,因此可以利用污泥来培肥或调控土壤中碳库质量的变化,同时,可以通过添加腐熟污泥改善酸性土壤的酸化现象。

参 考 文 献

[1] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5058 - 5066. ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5058 - 5066. (in Chinese)

[2] 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 等. 无害化污泥堆肥施用量对砂质潮土土壤活性有机碳组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 105 - 113. GUO Kangli, JI Zhengyu, LIU Xiao, et al. Effects of the application rate of non-hazardous composted sewage sludge on soil active organic carbon fractions of sandy fluvo-aquic soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 105 - 113. (in Chinese)

[3] 刘满强, 胡锋, 陈小云, 等. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2642 - 2649. LIU Manqiang, HU Feng, CHEN Xiaoyun, et al. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6): 2642 - 2649. (in Chinese)

[4] 孙忠祥, 李勇, 赵云泽, 等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 255 - 262.

- SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 256–262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190128&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.028. (in Chinese)
- [5] 张丽敏, 徐明岗, 姜翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3817–3825.
- ZHANG Limin, XU Minggang, LOU Yilai, et al. Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3817–3825. (in Chinese)
- [6] 王艳, 杨丽娟, 周崇峻, 等. 长期施肥对设施蔬菜栽培土壤易氧化有机碳含量及其剖面分布的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 31–35.
- WANG Yan, YANG Lijuan, ZHOU Chongjun, et al. Effects of long-term fertilization on the EOC content in vegetable soil in greenhouse[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 31–35. (in Chinese)
- [7] 龚伟, 颜晓元, 王景燕, 等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1245–1252.
- GONG Wei, YAN Xiaoyuan, WANG Jingyan, et al. Effects of long-term fertilization on soil humus carbon and nitrogen fractions in a wheat-maize cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1245–1252. (in Chinese)
- [8] 蒋友如, 盛浩, 王翠红, 等. 湘东丘陵区4种林地深层土壤溶解性有机碳的数量和光谱特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(3): 61–67.
- JIANG Youru, SHENG Hao, WANG Cuihong, et al. Dissolved organic carbon in deep forest soil horizon in eastern Hunan Province: amount and ultraviolet-visible spectroscopic features[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2014, 9(3): 61–67. (in Chinese)
- [9] 杨黎芳, 李贵桐, 林启美, 等. 栗钙土不同土地利用方式下土壤活性碳酸钙[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 428–432.
- YANG Lifang, LI Guitong, LIN Qimei, et al. Active carbonate of chestnut soils in different lands[J]. Ecology and Environment, 2010, 19(2): 428–432. (in Chinese)
- [10] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 986–990.
- YANG Lifang, LI Guitong. Advances in research of soil inorganic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 986–990. (in Chinese)
- [11] 刘世全. 土壤pH与碳酸钙含量的关系[J]. 土壤, 2002, 34(5): 279–282, 288.
- LIU Shiquan. Relationship between pH and calcium carbonate content in soil[J]. Soils, 2002, 34(5): 279–282, 288. (in Chinese)
- [12] GONG W, YAN X Y, WANG J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. Geoderma, 2009, 149(3–4): 318–324.
- [13] 郭金瑞, 宋振伟, 彭宪现, 等. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 178–185.
- GUO Jinrui, SONG Zhenwei, PENG Xianxian, et al. Evaluation in soil carbon and nitrogen characteristics under long-term cropping regimes in black soil region of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 178–185. (in Chinese)
- [14] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 130–135.
- LI Xinhua, GUO Honghai, ZHU Zhenlin, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 130–135. (in Chinese)
- [15] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 160–167.
- CHEN Anqiang, FU Bin, LU Yao, et al. Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 160–167. (in Chinese)
- [16] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2464–2474.
- LI Yanxia, CHEN Tongbin, LUO Wei, et al. Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(11): 2464–2474. (in Chinese)
- [17] 冀拯宇, 周吉祥, 郭康莉, 等. 连续施用无害化污泥堆肥对砂质潮土肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1276–1284.
- Ji Zhengyu, ZHOU Jixiang, GUO Kangli, et al. Effects of continuous application of non-hazardous sewage sludge compost on fertility of sandy fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(5): 1276–1284. (in Chinese)
- [18] HU J, WU J G, QU X J. Decomposition characteristics of organic materials and their effects on labile and recalcitrant organic carbon fractions in a semi-arid soil under plastic mulch and drip irrigation[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(1): 115–128.
- [19] 张强, 卜玉山. 污泥对不同土壤全氮和有机质及重金属含量的影响[J]. 山西农业科学, 2017, 45(3): 433–437.
- ZHANG Qiang, BU Yushan. Effect of sewage sludge on total nitrogen, organic matter and heavy metals content in different soils[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 433–437. (in Chinese)
- [20] 常会庆, 郑彩杰, 李兆君, 等. 污泥施用对根际和非根际石灰性土壤中细菌多样性的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2250–2261.
- CHANG Huiqing, ZHENG Caijie, LI Zhaojun, et al. Effects of sludge addition on bacterial diversity in rhizosphere and non-rhizosphere calcareous soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(9): 2250–2261. (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] LEFROY R D B, BLAIR G, STONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155: 399–402.
- [23] LEIFELD J, KOGEL-KNABNER I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? [J]. Geoderma, 2005, 124(1): 143–155.
- [24] 黄野. 污泥施用对沙质草地土壤呼吸和溶解性有机碳的影响[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2007.
- HUANG Ye. Effects of sludge application on soil respiration and dissolved organic carbon in sandy grassland[D]. Shenyang:

Liaoning University, 2007. (in Chinese)

- [25] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 352–353.
- [26] 张力. 土壤有机碳和无机碳耦合关系研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(32): 121–123, 133.
ZHANG Li. Research progress of relationship between soil organic carbon and soil inorganic carbon[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(32): 121–123, 133. (in Chinese)
- [27] SCHARENBRUCH B C, MEZA E N, CATANIA M, et al. Biochar and biosolid increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(5): 1372–1385.
- [28] POWLSON D S, WHITMORE A P, GOULDING K W T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false[J]. European Journal of Soil Science, 2011, 62(1): 42–55.
- [29] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 525–533.
SONG Zhenzhen, LI Xuhua, LI Juan, et al. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(3): 525–533. (in Chinese)
- [30] PURAKAYASTHA J, RUDRAPPA L, SINGH D, et al. Long-term impact of fertilizers on soil organic carbon pools and sequestration rates in maize–wheat–cowpea cropping system[J]. Geoderma, 2008, 144(1–2): 370–378.
- [31] 井大伟, 王明友, 张红. 鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 192–200.
JING Dawei, WANG Mingyou, ZHANG Hong. Soil organic carbon oxidation stability and carbon pool management index in kidney bean/maize rotation soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 192–200. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160824&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.024. (in Chinese)
- [32] 杨黎芳, 李贵桐, 李保国. 土壤发生性碳酸盐碳稳定性同位素模型及其应用[J]. 地球科学进展, 2006, 21(9): 973–979.
YANG Lifang, LI Guotong, LI Baoguo. The carbon stable isotope model of the pedogenic carbonate and its application[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(9): 973–979. (in Chinese)
- [33] 潘根兴, 曹建华, 周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 325–334.
PAN Genxing, CAO Jianhua, ZHOU Yunchao. Soil carbon and significance in carbon cycling of earth surface system[J]. Quaternary Science, 2000, 20(4): 325–334. (in Chinese)
- [34] 曾骏, 董博, 张东, 等. 不同施肥方式对灌漠土土壤有机碳无机碳和微生物量碳的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 33–38.
ZENG Jun, DONG Bo, ZHANG Dong, et al. Effect of long-term fertilization on organic inorganic and microbial biomass carbon in irrigated desert soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2): 33–38. (in Chinese)
- [35] 荣井荣, 李晨华, 王玉刚. 长期施肥对绿洲农田土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 592–597.
RONG Jingrong, LI Chenhua, WANG Yugang, et al. Effect of long-term fertilization on soil organic carbon and soil inorganic carbon in oasis cropland[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 592–597. (in Chinese)
- [36] 王晓辉, 赵可, 张小雨, 等. 堆肥污泥对盐碱土特性和玉米生长的影响研究[J]. 资源节约与环保, 2019(3): 17, 21.
WANG Xiaohui, ZHAO Ke, ZHANG Xiaoyu, et al. Study on the effect of compost sludge on the characteristics of saline alkali soil and the growth of corn[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2019(3): 17, 21. (in Chinese)
- [37] 张林, 孙向阳, 高程达, 等. 荒漠草原原生土壤次生碳酸盐形成和周转过程中固存 CO₂ 的研究[J]. 土壤学报, 2010, 46(4): 234–242.
ZHANG Lin, SUN Xiangyang, GAO Chengda, et al. CO₂ sequestration in formation and turnover of pedogenic carbonates in soil of desert steppe Inner Mongolia, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 46(4): 234–242. (in Chinese)
- [38] CIHACEK L J, ULMER M G. Effects of tillage on inorganic carbon storage in soils of the Northern Great Plains of the US[J]. American Journal of Soil Science Society, 2002, 45: 63–69.
- [39] 张宁, 何兴东, 邬畏. 腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙特征[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4094–4102.
ZHANG Ning, HE Xingdong, WU Wei. Studies on the characteristics of soil organic matter and pedogenic calcium carbonate for three kinds of soil in the Tengri Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4094–4102. (in Chinese)
- [40] DONER H E, LYNN W C. Minerals in soil environments[J]. Soil Science of Social Madison, 1977, 15(2): 23–42.
- [41] KUZIAKOV Y, SHEVTZOVA E, PUSTOVOYTOV K. Carbonate re-crystallization in soil revealed by ¹⁴C labeling: experimental model and significance for paleo-environmental reconstructions[J]. Geoderma, 2006, 131(1/2): 45–58.
- [42] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1365–1371.
TANG Guoyong, LI Kun, SUN Yongyu, et al. Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley[J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1365–1371. (in Chinese)
- [43] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 676–684.
LUO Kun, HU Ronggui, ZHANG Wenju, et al. Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 676–684. (in Chinese)
- [44] 罗梅, 田冬, 高明, 等. 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4328–4337.
LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming. Soil organic carbon of purple soil as affected by different application of biochar[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4328–4337. (in Chinese)
- [45] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3589–3605.
ZENG Quanchao, LI Xin, DONG Yanghong, et al. Soil microbial biomass nitrogen and carbon, water soluble nitrogen and carbon under different arbors forests on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3589–3605. (in Chinese)
- [46] 陈立新, 宋志韬, 纪萱. 红松人工林腐殖质组成及其结合形态研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 39–44.
CHEN Lixin, SONG Zhitao, JI Xuan. Study on compositions of soil humus and their combining forms of *Pinus koraiensis* plantations[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(3): 39–44. (in Chinese)