

# 渭北苹果园土壤有机碳库变异特征\*

石宗琳<sup>1</sup> 王益权<sup>1†</sup> 冉艳玲<sup>1</sup> 张露<sup>1</sup> 喻建波<sup>1,2</sup> 焦彩强<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 陕西省果业局, 西安 710018)

## VARIATION OF SOIL ORGANIC CARBON POOL IN APPLE ORCHARDS IN WEIBEI

Shi Zonglin<sup>1</sup> Wang Yiquan<sup>1†</sup> Ran Yanling<sup>1</sup> Zhang Lu<sup>1</sup> Yu Jianbo<sup>1,2</sup> Jiao Caiqiang<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Fruit Industry Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

关键词 渭北旱塬; 苹果园; 土壤有机碳库; 变异特征

中图分类号 S158.2 文献标识码 A

土壤碳库是陆地生态系统中最大且最活跃的碳库之一, 是全球碳循环的核心内容。土壤有机碳的固定和矿化不仅对全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度起着重要的调节作用<sup>[1]</sup>, 而且影响着土壤肥力及作物产量<sup>[2-3]</sup>, 指示着植被演替的结果和演化的趋势, 倍受学术界广泛关注。

有关各种生态类型条件下土壤有机碳循环规律的研究成果颇丰, 其中对森林土壤、农田土壤及草地土壤有机碳动态变化研究相对深入和广泛<sup>[4-12]</sup>。不同土地利用方式和管理措施影响土壤有机碳含量分布, 其中土地利用方式对土壤有机碳储量的影响, 不仅因植被类型而异, 即便是同种植被类型, 不同生长期也有差别<sup>[13]</sup>。果园作为渭北地区重要的土地利用方式之一, 其土壤扰动过程一般较农田少、施肥量较农田高、果树根系分泌物逐年累积等, 具备了土壤有机碳累积与提升的基本条件, 影响着区域土壤碳库平衡。果园有机碳含量与果园产量呈显著正相关, 提高果园有机碳含量不但有助于实现稳产高产, 而且可提高果品品质<sup>[14]</sup>。对陕西苹果主产区 15 个基地县丰产果园抽样调查表明, 陕西苹果主产区丰产果园的土壤有机质含量相对较高, 但在调查的果园中, 只有 25% 的果园土壤有

机质含量才能达到绿色果品产地土壤肥力 II 级标准<sup>[15]</sup>; 渭北地区 56 个苹果园 0~40 cm 土壤有机质含量的现状为  $\geq 10.0 \text{ g kg}^{-1}$  的果园占到 89%<sup>[16]</sup>; 种植生草能显著提高黄土高原旱地果园 0~20 cm 土壤有机质含量<sup>[17]</sup>; 渭北塬区不同地形条件和种植年限果园土壤有机碳状况通常为, 在塬面和梁坡梯田两种地形条件下, 同龄果园土壤有机碳差异显著, 随园龄增长土壤有机碳消长趋势基本相似<sup>[13]</sup>。上述研究工作多限于果园表层土壤有机碳含量研究, 基于果园土壤剖面碳库变异趋势的研究鲜见。本文以渭北地区不同园龄苹果园土壤剖面不同层次有机碳含量的变异特征为切入点, 探求植果过程中土壤有机碳含量的时(年限)、空(剖面层次)变化特征。该研究将有助于丰富旱塬地区不同覆被条件下土壤碳库演化理论, 为地区苹果业可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验选在陕西省渭北旱塬旬邑县, 该县地形、地势、土壤类型、气候特征及植果历史、果园管理水平等均能代表渭北旱塬的基本情况, 这里地势呈东

\* 农业部 2010 年农村能源综合建设项目(1251005507)资助

† 通讯作者: 王益权(1957—), 陕西旬邑人, 从事土壤物理与改良。E-mail: soilphysics@163.com

作者简介: 石宗琳(1986—), 女, 重庆巴南人, 硕士研究生, 主要从事果园土壤质量研究。E-mail: missshilin@163.com

收稿日期: 2012-02-26; 收到修改稿日期: 2012-06-15

北高西南低,沿东北到西南呈多条黄土塬面分布,平均海拔高度 1300 m,属于典型的黄土高原沟壑和暖温带季风气候区。年平均气温 9.0℃,年平均降雨量 600 mm 左右,干燥度 1.1~1.3,平均湿润指数为 0.65,无灌溉条件,属典型雨养农业区。主要土壤类型为黏黑垆土(系统分类名称为堆垫干润均腐土,Cumuli-Ustic Isohumosols),土体通透性良好,保水保肥力较强。试验地分布在该县太浴、赤道、张洪及原底共 4 个乡镇,为了研究苹果园土壤碳库的演化趋势,且遵循单一差异的原则,在每个乡镇自然条件一致、植果前土地利用背景相同的范围内,各选择了 3 个园龄段果园作为试验处理,以达到符合“空间代替时间”研究方法的要求,果树品种均为红富士。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 土壤采样及分析 采样时间为 2011 年 3

月份苹果树萌芽期。根据实验设计要求,在自然生态条件相同范围内,选择园龄分别为 >15 a、10~15 a、<10 a 果园作为研究对象。将 4 个乡镇的 3 个园龄果园作为试验重复,在每个果园内选取代表性果树各 3 棵,在树冠垂直投影范围内距树干 2/3 处采集土壤样品,按照 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 间距逐层采剖面土样,将在同果园 3 棵树冠下所采取的同层土样进行混合,以减少果树个体带来的差异。共计在 12 个果园内的 36 个点位上采得土壤样品数 72 个。将土样带回室内经自然风干,磨细、过筛,用于土壤有机碳含量测定。同时,用镶有环刀的土钻在每一层取得原状土样,以测定土壤剖面各层土壤容重(见表 1)。土壤有机碳(有机质)测定用重铬酸钾容量法<sup>[18]</sup>。

表 1 不同园龄苹果园土壤容重(g cm<sup>-3</sup>)

园龄(a)	土层					
	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
>15	1.19	1.19	1.34	1.41	1.41	1.41
10~15	1.25	1.29	1.35	1.24	1.24	1.24
<10	1.12	1.13	1.36	1.48	1.48	1.48

1.2.2 土壤有机碳密度的计算 土壤有机碳密度是指单位面积一定深度土层内有机碳的储量,一般用 t hm<sup>-2</sup>,或 kg m<sup>-2</sup>表示,土壤碳密度已成为评价和衡量土体中有机碳储量的重要的指标。土壤有机碳密度计算方法参考文献[19-20],如下:

某一土层有机碳密度(SOC<sub>i</sub>, kg m<sup>-2</sup>)计算公式为:

$$SOC_i = D_i \times E_i \times C_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

式中,*i*为土层代号,*C<sub>i</sub>*为*i*层土壤有机碳含量(g kg<sup>-1</sup>),*D<sub>i</sub>*为容重(g cm<sup>-3</sup>),*E<sub>i</sub>*为土层厚度(cm),*G<sub>i</sub>*为直径大于 2 mm 的石砾所占体积百分比(%),供试土壤为黄土母质发育的黏黑垆土,土体内大于 2 mm 的石砾几乎为零,忽略不计。

某土体深度(剖面深度)为*d*(cm),由*n*层组成,那么,该土体深度*d*内有机碳密度 SOC<sub>*d*</sub>(kg m<sup>-2</sup>)计算如式(2):

$$SOC_d = \sum_{i=1}^n D_i \times E_i \times C_i \times (1 - G_i) / 100 \quad (2)$$

各层土壤单位面积有机碳储量占总有机碳储量的百分比的计算如公式(3):

$$R_i = \frac{SOC_i}{\sum_{i=1}^n SOC_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中*i*为土层代号,*R<sub>i</sub>*表示第*i*层土壤单位面积有机碳储量占总有机碳储量的百分比,*SOC<sub>i</sub>*表示第*i*层土壤有机碳密度(kg m<sup>-2</sup>),*n*为土壤层数。

## 1.3 数据处理

数据处理采用 Excel2003 和 SAS 数据处理软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 渭北苹果园土壤有机质含量状况及其评价

对各园龄段 4 个苹果园土壤有机质含量的平均测定结果见表 2。由表 2 知,3 个园龄段苹果园 0~40 cm 土层有机质平均含量为 11.46~16.57 g kg<sup>-1</sup>,40~100 cm 土层有机质含量为 10.12~10.81 g kg<sup>-1</sup>,只有表层 0~10 cm 土壤有机质平均含量大于 15.0 g kg<sup>-1</sup>,其余土层均低于 15.0 g kg<sup>-1</sup>。参考山东省苹果园土壤有机质含量分级标准<sup>[21]</sup>:>20.0 g kg<sup>-1</sup>为高含量、15.0~20.0 g kg<sup>-1</sup>为适

宜、10.0 ~ 15.0 g kg<sup>-1</sup>为中等,6.0 ~ 10.0 g kg<sup>-1</sup>为低等,<6.0 g kg<sup>-1</sup>为极低含量等标准,渭北苹果园土壤0 ~ 100 cm 土层有机质含量均处于中等水平范围。根据绿色食品产地土壤肥力分级指标<sup>[22]</sup>: >20.0 g kg<sup>-1</sup>为优良、15.0 ~ 20.0 g kg<sup>-1</sup>中等、<15.0 g kg<sup>-1</sup>为较差的标准判断,渭北苹果园0 ~ 100 cm 土层有机质含量属于较差水平。渭北苹果

园主要依靠无机化肥投入维持果树营养。每年果实采收后因惧怕病虫害危害,大部分果农将果树的落叶和套带材料等清理出果园,缺少有机物的投入是渭北苹果园土壤有机质含量不高的主要原因之一。为了满足优质果园需求,达到绿色果园土壤肥力标准,在渭北地区加大果园有机肥料的施用,提升土壤有机质含量仍显得极为重要。

表2 渭北苹果园土壤剖面有机质含量状况(g kg<sup>-1</sup>)

园龄(a)	土层剖面有机质					
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm
< 10	16.12aB	14.45bA	10.83cB	10.63cA	10.17cA	9.87cA
10 ~ 15	16.41aAB	13.94bA	11.18cB	9.96cA	11.02cA	9.95cA
> 15	17.19aA	15.56bA	12.38cA	11.11cdA	11.23cdA	10.55dA
平均值	16.57	14.65	11.46	10.71	10.81	10.12
标准偏差	0.55	0.82	0.81	0.58	0.56	0.37
变异系数	3.34	5.63	7.07	5.46	5.19	3.67

注:小写字母代表同一园龄果园不同土层间有机质含量差异达显著水平( $p < 0.05$ );大写字母代表不同园龄果园在相同土层间土壤有机质差异达显著水平( $p < 0.05$ )

## 2.2 渭北苹果园土壤有机碳含量变化特征

渭北苹果园土体内各土层有机碳含量大小及分布情况见表3,果园土壤有机碳含量介于5.72 ~ 9.97 g kg<sup>-1</sup>之间,平均含量为7.17 g kg<sup>-1</sup>,其中最大值是最小值的1.74倍。3个园龄苹果园土壤在0 ~ 100 cm 土体范围有机碳的平均含量变化在6.97 ~ 7.54 g kg<sup>-1</sup>之间,尽管在不同园龄之间其值未达到显著水平,但仍显示出随园龄增加而递增的趋势。进一步对不同园龄果园土壤剖面有机碳含量逐层地比较与分析,可知只有在0 ~ 10 cm

和20 ~ 40 cm 处土壤有机碳含量随园龄递增有显著增加的趋势。上述分析说明渭北旱塬土壤有机碳递增极为缓慢,只是在时间尺度>15 a 以上其差异才能达到显著水平。在其他土层不同园龄之间土壤有机碳含量差异不仅达不到显著水平,而且在10 ~ 20 cm 和40 ~ 60 cm 处还呈现出>15 a 果园><10 a 果园>10 ~ 15 a 果园的趋势,说明从原农田生态系统改为果园生态系统后,剖面上有机碳含量似乎开始有所递减,然后才显出缓慢地递增的趋势。

表3 不同园龄苹果园土壤有机碳含量和有机碳密度

土层(cm)	有机碳含量(g kg <sup>-1</sup> )			有机碳密度(kg m <sup>-2</sup> )		
	< 10a	10 ~ 15a	> 15a	< 10a	10 ~ 15a	> 15a
0 ~ 10	9.35aB	9.52aAB	9.97aA	1.05bC	1.19cA	1.12bB
10 ~ 20	8.38bA	8.09bA	9.02bA	0.95bA	1.04cA	1.02bA
20 ~ 40	6.28cB	6.49cB	7.18cA	1.71aB	1.75aB	1.95aA
40 ~ 60	6.17cA	5.78cA	6.44cdA	1.82aA	1.43bB	1.91aA
60 ~ 80	5.90cA	6.39cA	6.51cdA	1.74aAB	1.59abB	1.93aA
80 ~ 100	5.72cA	5.77cA	6.12dA	1.69aAB	1.43bB	1.81aA
平均值	6.97	7.01	7.54	—	—	—

注:小写字母代表同一园龄果园不同土层间有机碳含量及密度差异达显著水平( $p < 0.05$ );大写字母代表相同土层在不同园龄果园间土壤有机碳及密度差异达显著水平( $p < 0.05$ )

从表3还可看出果园土壤有机碳含量均随着土层深度增加呈显著递减趋势,且0~40 cm土层有机碳含量与40~80 cm土层差异显著,尤其是在<10 a果园和10~15a果园表现得非常明显,而大于15a以上果园,在0~80 cm范围内各土层有机碳均显示出一定的递增趋势,且剖面内各土层间有机碳含量差异在缩小。

### 2.3 渭北苹果园土壤有机碳密度变化特征

研究区域土壤中无>2 mm石砾,根据公式(1)逐层计算果园土壤有机碳密度,结果见表3。对于0~100 cm范围而言,单位面积果园土壤有机碳密度变异在8.43~9.74 kg m<sup>-2</sup>之间,>15 a果园土壤有机碳密度为最大,达到了9.74 kg m<sup>-2</sup>,其次为<10 a果园,有机碳密度为8.96 kg m<sup>-2</sup>,10~15a果园有机碳密度最小,为8.43 kg m<sup>-2</sup>,各园龄间差异在时间尺度大于15 a条件下才能达到显著水平(见图1)。

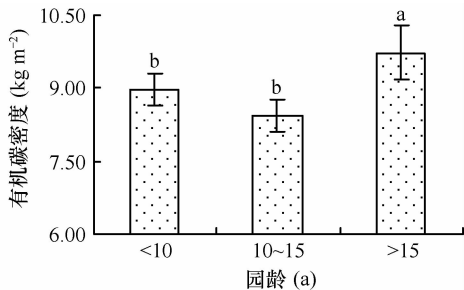


图1 苹果园0~100 cm土层有机碳密度比较

### 2.4 渭北苹果园土壤剖面有机碳储量分布特征

对各园龄段苹果园土壤逐层地进行有机碳库百分比计算结果如图2,0~20 cm表层土壤仍然是渭北果园土壤有机碳储量主要土层(均大于21.90%),随着园龄的递增,表层土壤有机碳库占绝对优势的效应在逐渐减弱,中下层剖面土壤碳库百分比逐渐提升。说明随园龄的增加,在0~100 cm范围内各层土壤有机碳储量百分比趋向均匀化。

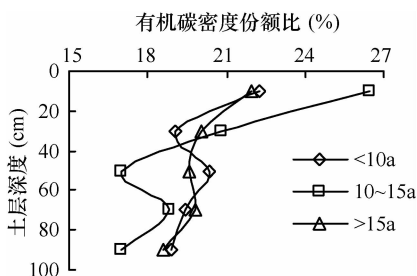


图2 苹果园土壤有机碳储量剖面分布

## 3 结论与讨论

1) 苹果园土壤有机质与果园管理水平有一定关系,尽管渭北地区以独特的自然生态条件成为苹果优生区,然而作为优质果园条件,多数果农对有机肥重视不够,果园土壤有机质含量普遍较低,与国外优质苹果产地土壤有机质含量差距较大,果业可持续发展水平较低<sup>[23]</sup>。本试验对渭北苹果园土壤有机质含量研究结果表明,渭北果园土壤0~100 cm土层有机质平均含量在10.12~16.57 g kg<sup>-1</sup>。依据山东省苹果园土壤有机质含量分级标准和绿色食品产地土壤肥力分级指标,该区域果园土壤有机质含量属于中低水平,此结果与王留好等<sup>[16]</sup>对渭北地区苹果园土壤有机质现状调查结果相符。应采取施用有机肥、无机有机配施、果园种草或秸秆还田等方式来提高土壤有机质含量。

2) 苹果树是深根性植物,具有庞大的根系支撑着地上冠层,果树深根系为下层提供大量的有机物<sup>[24]</sup>,并且深层有机物难于分解<sup>[25]</sup>,因此果树根系分布制约了果园土壤有机碳的含量与分布。在黄土高原苹果根系可深及2~3 m,但在黏重土壤通常不超过80 cm<sup>[26]</sup>。甘卓亭等<sup>[27]</sup>对渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征研究得出大于10 a生苹果表层(0~20 cm)平均根长密度低于下层(20~40 cm),高峰值一般出现在40~80 cm,此深度以下根长密度随深度递减,这是旱地果园根系空间分布的基本特征。有研究表明小于15a果园种植方式有利于土壤有机碳的增加,大于15a果园土壤有机碳下降<sup>[13]</sup>。本试验对渭北不同园龄苹果园不同剖面深度有机碳含量的研究结果表明,渭北果园0~100 cm土壤有机碳平均含量随园龄增加呈现递增的趋势,在时间尺度大于15a范围内,与其他园龄差异达到显著水平,证实植果过程中有利于土壤有机碳的累积,但累积趋势极为缓慢,与甘卓亭等<sup>[13]</sup>研究结果略有差异,可能是研究果园土壤空间深度不同所致。从土壤有机碳的垂直分布看,土壤表层有机碳含量最高,随着土壤深度的增加,有机碳含量呈减少趋势,与张心昱等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。综合时空尺度分析,随着种植年限的增加果园土壤有机碳含量在0~10 cm和20~40 cm处递增明显,而在10~20 cm和40~60 cm处呈现出先减后增趋势,说明植果期间土壤质量在不同土层呈现不同方向和不同程度的阶段性变化过程。

3) 土壤有机碳储量是进入土壤的生物残体等有机物质的输入与以土壤微生物分解作用为主的有机物质的损失之间的平衡<sup>[29]</sup>,受气候、地形、植被、成土母质等因子及诸多因子间相互作用的影响<sup>[30]</sup>,而人类的土壤管理措施降低了这种影响<sup>[7]</sup>。渭北地区果园土壤有机肥料投入少,且大多采取传统的清耕模式,有机物的归还来源少。随着植果年限的增加,果树根系生长旺盛,根系的分泌物增多,土壤碳汇增加。本研究得出,在时间尺度大于15a的条件下,0~100 cm 土壤有机碳密度显著增加,同时显示由农田生态系统转为果园生态的前期,果园碳密度有一定的递减,然后才缓慢提升。从空间上看,表层0~20 cm 仍然占据着0~100 cm 土体碳总密度的绝对比例。随着园龄递增土壤剖面上下土层碳密度趋于均等化。在今后的果园管理中,应该通过施肥、免耕等措施来提高土壤碳汇,减少碳流失,增加果园土壤的固碳能力。

### 参 考 文 献

- [1] 吴庆标,王效科,任玉芬. CO<sub>2</sub> 红外分析仪在土壤有机碳矿化中的测试与应用研究. 土壤, 2006, 38(3): 304—308
- [2] 迟光宇,王俊,陈欣,等. 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化. 土壤, 2006, 38(6): 755—761
- [3] 沈宏,曹志洪,王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数. 自然资源学报, 1999, 14(3): 206—211
- [4] 李强,马明东,陈暮初. 中亚热带4种森林类型土壤碳密度和碳储量研究. 浙江林业科技, 2007, 27(4): 8—12
- [5] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等. 不同林分土壤有机碳密度研究. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889—893
- [6] 杨晓梅,程积民,孟蕾,等. 不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征. 中国农学通报, 2010, 26(9): 132—135
- [7] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. 土壤学报, 2004, 41(5): 687—699
- [8] 许信旺,潘根兴,侯鹏程. 不同土地利用对表层土壤有机碳密度的影响. 水土保持学报, 2005, 19(6): 194—200
- [9] 杨雨林,郭胜利,马玉红. 黄土高原沟壑区不同年限苹果园土壤碳、氮、磷变化特征. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 685—691
- [10] 刘伟,程积民,陈芙蓉,等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量. 草地学报, 2011, 19(3): 425—431
- [11] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响. 生态学报, 2007, 27(6): 2 279—2 287
- [12] Liu X, Li F M, Liu D Q, et al. Soil organic carbon, carbon fractions and nutrients as affected by land use in semi-arid region of Loess Plateau of China. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 146—152
- [13] 甘卓亭,张掌权,陈静,等. 黄土塬区苹果园土壤有机碳分布特征. 生态学报, 2010, 30(8): 2 135—2 140
- [14] 路克国,朱树华,张连忠. 有机肥对土壤理化性质和红富士苹果果实品质的影响. 石河子大学学报:自然科学版, 2003, 7(3): 205—208
- [15] 刘子龙,张广军,赵政阳,等. 陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 50—53
- [16] 王留好,同延安,刘剑. 陕西渭北地区苹果园土壤有机质现状评价. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 189—192
- [17] 李会科,赵政阳,张广军. 果园生草理论与实践—以黄土高原南部苹果园生草实践为例. 草业科学, 2005, 22(8): 32—35
- [18] 鲍士旦. 土壤农业化学分析. 第3版. 北京:中国农业出版社, 2000
- [19] 徐艳,张凤荣,段增强,等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨. 土壤通报, 2005, 36(6): 837—839
- [20] 邵月红,潘剑君,许信旺,等. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法. 土壤通报, 2006, 37(5): 1 007—1 011
- [21] 姜远茂,顾曼加,束怀珊. 山东省苹果园土壤营养成分分析. 果树科学, 1997, 14(增刊): 35—37
- [22] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 NY/T391-2000 绿色食品 产地环境技术条件. 北京:中国标准出版社, 2000
- [23] 杨世琦,张爱平,杨淑静,等. 典型区域果园土壤有机质变化特征研究. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1 124—1 127
- [24] 刘景双,杨继松,于君宝,等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征. 水土保持学报, 2003, 17(3): 5—8
- [25] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6: 317—327
- [26] 陆秋农,贾定贤. 中国果树志:苹果卷. 北京:中国农业科技出版社,中国林业出版社, 1999
- [27] 甘卓亭,刘兆文. 渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征. 生态学报, 2008, 28(7): 3 401—3 407
- [28] 张心昱,陈利顶,傅伯杰,等. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响——以北京市延庆盆地为例. 生态学报, 2006, 26(10): 3 198—3 204
- [29] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K, et al. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climatic Change*, 2001, 51(1): 73—99
- [30] 王丹丹,史学正,于东升,等. 东北地区旱地土壤有机碳密度的主控自然因素研究. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1 049—1 053