

贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系

闫俊华^{1*}, 周传艳², 文安邦³, 刘兴诏^{1,4}, 褚国伟¹, 李坤^{1,4}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 贵州省喀斯特资源环境与发展研究中心, 贵阳 550001;

3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 测定了不同石漠化等级的西南喀斯特生态系统的土壤容重和土壤有机碳。结果表明: 西南喀斯特生态系统的土壤容重为 $0.91 \sim 1.37 \text{ kg cm}^{-3}$, 土壤有机碳含量变化较大, 为 $8.1 \sim 58.9 \text{ g kg}^{-1}$ 。在 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 的土层中, 没有发生石漠化的生态系统的有机碳储量达 16.91 kg m^{-2} , 伴随着石漠化程度的加剧, 土壤有机碳储量急剧下降, 极度退化土壤的有机碳储量只有 0.52 kg m^{-2} 。在 1999–2005 年间, 中国西南石漠化(约 $55 \times 10^4 \text{ km}^2$)导致的有机碳流失通量年增加量超过 28 Tg。同时, 探讨了喀斯特石漠化过程中土壤有机碳流失的去向, 喀斯特石漠化过程土壤有机碳对生态恢复的限制作用, 利用土壤容重推算土壤有机碳的可靠性。

关键词: 喀斯特; 石漠化; 土壤有机碳; 土壤容重

中图分类号: P951

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2011)03-0273-06

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.03.013

Relationship between Soil Organic Carbon and Bulk Density in the Rocky Desertification Process of Karst Ecosystem in Guizhou

YAN Jun-hua^{1*}, ZHOU Chuan-yan², WEN An-bang³, LIU Xing-zhao^{1,4}, CHU Guo-wei¹, LI Kun^{1,4}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Research Center of Karst Resources

Environment and Development, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment,

Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The relationship between soil bulk density and soil organic carbon in a rocky desertification process of karst ecosystem in Guizhou were studied by using time-space mutual substitution method. The results showed that the soil bulk density ranged from 0.91 kg cm^{-3} to 1.37 kg cm^{-3} , and soil organic carbon content from 8.1 g kg^{-1} to 58.9 g kg^{-1} . Soil organic carbon storage decreased with the progress of rocky desertification, there were 16.91 kg m^{-2} in the original karst ecosystem and 0.52 kg m^{-2} in the extreme rocky desertification area at $0 \sim 40 \text{ cm}$ soil depth layer. Annual soil organic carbon loss caused by rocky desertification was more than 28 Tg during 1999–2005 in Southwest China. Furthermore, where soil organic carbon went in the rocky desertification process was discussed, as well as the inhibition effects of soil organic carbon on ecosystem restoration, and the reliability of soil organic carbon calculated by soil bulk density.

Key words: Karst; Rocky desertification; Soil organic carbon; Soil bulk density

土壤是生态系统中生物群落正常生命活动所需元素的主要来源, 而有机碳是土壤的重要组成部分, 对土壤有机质的多少具有一定的指示作用, 并

对维持生物的生长发育有着重要的调控作用, 影响着土壤物理、化学和生物的全过程^[1]。中国西南喀斯特地区地处云贵高原, 土地干燥、贫瘠, 加上人类

收稿日期: 2010-09-30

接受日期: 2011-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAD98B01)资助

作者简介: 闫俊华(1973 ~), 男, 博士, 研究员, 研究领域为生态系统生态学

* 通讯作者 Corresponding author, email: jhyan@scib.ac.cn

活动频繁,生态系统已受到严重损伤,从而导致喀斯特生态系统土壤有机碳发生重要变化^[2]。同时,喀斯特地区的母质是碳酸盐岩,碳酸盐岩是全球最大的碳库,喀斯特石漠化过程中,土壤有机碳的转变对于全球碳循环有着极其重要的作用^[3],因此,揭示喀斯特生态系统石漠化过程土壤有机碳动态是喀斯特生态恢复和全球变化研究值得关注的问题。

陆地生态系统是一个巨大的碳库,它可以调控由于 CO₂ 浓度上升所导致的全球变暖,而在这个系统中土壤子系统扮演着重要的角色,对北半球温带森林生态系统的研究表明,植被中有机碳储量不到土壤的 1/2,而北方森林生态系统土壤的有机碳储量是植被的 5 倍多^[4-5]。土壤中有机碳并不是稳定的,是碳输入与碳输出长期平衡的结果。影响土壤碳输入与输出的因子众多,而且关键调控因子又有所不同,其中,土地利用方式的变化或生态系统的退化是影响土壤作为碳源、汇的角色的重要因素,每年进入大气中的碳 $[(7.1 \pm 1.1)\text{PG}]$ 来自土地利用方式变化和生态系统退化占 20% 以上^[6]。

中国西南喀斯特地区是我国黄土、荒漠、冻土、石灰岩四大生态环境脆弱带之一,2006 年的调查显示,西南地区具有潜石漠化的土地面积可达到 45.2%,喀斯特石漠化相当严重且有蔓延趋势^[7]。尽管对喀斯特石漠化的治理已提上国家层面,并得到相关部委的重点支持,但严峻的现实是:基础研究滞后于生态工程建设,生态建设缺乏理论和方法的支撑。本文以贵州省普定岩溶山地为例,研究不同石漠化程度下的土壤有机碳及容重,探讨了石漠化过程土壤有机碳流失的去向,以及利用土壤容重推算土壤有机碳含量的可靠性,在实际应用中具有很强的现实意义。

1 研究区域自然概况

本研究于普定喀斯特综合实验站进行,该站位

于贵州省西部(西距贵阳 120 km),云贵高原东缘,处于长江和珠江两大水系的分水岭地带(北纬 26°17′~26°20′,东经 105°43′~105°45′)。典型的喀斯特地貌占该区面积的 85% 以上,海拔为 1042~1846 m。该地区属亚热带季风湿润气候,季节交替明显,年平均气温为 15℃,年平均日照时数为 1200 h,年平均降水量为 1400 mm,年均相对湿度为 80%,无霜期为 289 d,灾害性气候主要有干旱、暴雨等。

该区地层出露以二叠系、三叠系为主,土壤分布以石灰土为主,其次是黄壤,在成土母质的特殊作用下,石灰土与黄壤呈镶嵌分布。本区基本上是石灰岩类型植被,在 20 世纪 50 年代初,森林覆盖率近 30%,由于人类活动的干扰和破坏,许多地带性植被已不复存在,到 70 年代后期,森林覆盖率下降为 7%,到上世纪末,由于退耕还林还草,长江上游防护林营造工程得以实施,目前森林覆盖率逐渐回升到约 15%。

2 方法

2.1 时空互代与石漠化分级

本研究采用时空互代的方法,通过喀斯特石漠化等级不同而形成石漠化过程的时空系统,比较不同石漠化等级的喀斯特生态系统土壤有机碳状况,用以说明石漠化过程的有机碳动态。在研究区域内选定样地,每个样地都选在一个完整的喀斯特地貌单元内,尽量保证地形、坡向和海拔的一致性,按照喀斯特石漠化过程地面物质组成类型,以地表石质面积所占的比例,分为 5 级(表 1),级别越高,石漠化程度越严重^[8]。这里需要指明的是,本文的土壤容重指的是由土层覆盖条件下所取土壤样品的容重,对于石头裸露的地方没有取样,因此,在计算土壤有机碳储量时去掉了石质覆盖的面积,这里的土壤容重不代不代表样地的平均土壤层次容重。每一级石漠化选定 3 个样地,共计 15 个样地。样品采

表 1 喀斯特石漠化等级指标
Table 1 Rocky desertification classes in karst area

	等级 Class				
	1	2	3	4	5
石质面积比例 Area ratio of rock (%)	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
地面物质组成类型	土质	土质为主	土石质	石质为主	石质
Type of ground material composition	Soil	Soil-based	Soil and stone	Stone-based	Stone

集于2007年6月完成。

2.2 土壤容重

土壤容重采用不锈钢环刀法(容积为 100 cm^3), 表层土壤采5个重复样品, 其它层次采3个重复样品。将取回的环刀土样, 去掉顶盖, 先在电热板上烘到近乎风干状态, 然后放入烘箱中, 在 105°C 下烘干至恒重, 计算土壤容重: $\rho = (m_2 - m_1)/V$, 其中 ρ 为土壤容重(g cm^{-3}); m_1 为环刀的质量(g); m_2 为环刀和烘干土的质量(g); V 为环刀容积(cm^3)。对于石漠化严重的样点, 采用土坑法计算容重, 挖一个 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的土坑, 称量所有挖出土壤的重量(g), 同时采集土样 $15 \sim 20 \text{ g}$ 带回室内测定水分含量, 计算土壤容重。

2.3 土壤有机碳含量

土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法^[9], 按下式计算:

$$SOC = \frac{0.0132 \left[1 - \frac{V}{V_0} \right]}{mK} \times 1000$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量(%); V_0 、 V 分别为空白标定和滴定土样用去硫酸亚铁溶液体积(mL); m 为风干土样质量(g); K 为将风干土换算到烘干土的水分换算系数。

2.4 土壤有机碳储量

土壤有机碳储量按下式进行计算^[10]:

$$SOC_i = \sum_{i=1}^n SOC_i \times \rho_i \times H_i \times (1-A)$$

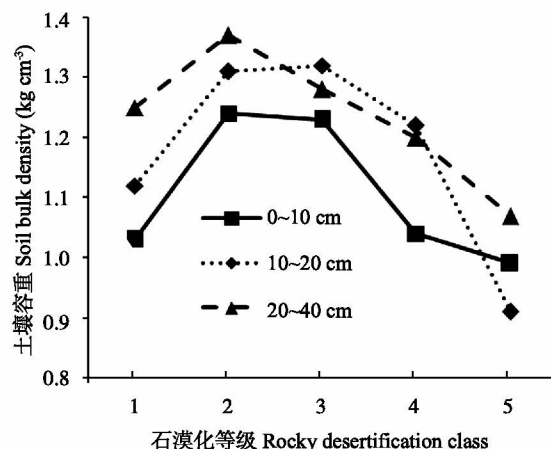
SOC_i 为土层 i 的有机碳含量; ρ_i 为土层 i 的容重; H_i 为土层 i 的厚度; A 为石漠化等级标准中的石质面积比例。

2 结果

2.1 土壤容重

石漠化是喀斯特地区土壤荒漠化的一种表现形式, 土壤因侵蚀而引起土壤组成发生改变, 物质元素流失严重, 其分布也因此严重不均, 导致土壤质量恶化。从图1可见, 不同石漠化等级的喀斯特生态系统土壤容重为 $0.91 \sim 1.37 \text{ kg cm}^{-3}$, 土壤容重在不同石漠化等级、不同土壤层次中的差异较大。在喀斯特生态系统石漠化过程, 各层次的土壤容重先增加, 然后下降, 呈开口向下的抛物线型(图1)。对于自然发育的土壤, 容重可以粗略地反映出土壤

物质元素的组成特征, 一般随土层深度的增加土壤容重呈增大趋势, 图1中以土质(1级)或土质为主(2级)的喀斯特生态系统遵循这样的规律。当喀斯特生态系统发生石漠化后(3~5级), 原有的土壤结构被破坏, 土壤物质流失并重新分配, 土壤层次改变或重塑, 土壤容重没有表现出随深度变化的特征。



2.2 土壤有机碳含量与有机碳储量

图2显示喀斯特生态系统土壤有机碳含量随土层深度的增加而减少, 没有发生石漠化(1级)或轻度石漠化(2级)的喀斯特生态系统中土壤有机碳含量表现最为明显。没有发生石漠化的0~10 cm土层的有机碳含量最高, 达 58.9 g kg^{-1} , 处于极度退化阶段(5级)的20~40 cm土层的含量最低, 仅为 8.1 g kg^{-1} 。

喀斯特生态系统石漠化, 一方面表现为地表植被覆盖率降低, 有机质来源减少, 矿化分解作用强烈, 不利于土壤有机碳的积累; 另一方面土壤有机质随着细粒物质的侵蚀而流出生态系统, 降低了土壤有机碳的含量。从图2还可看出, 伴随着石漠化程度的加剧, 土壤有机碳含量显著下降, 各土层的降幅达60%~75%。总体而言, 不同石漠化阶段和不同土壤层次间的土壤有机碳含量均存在较大差异。

喀斯特生态系统不同石漠化阶段的土壤有机碳储量的变化如图3所示。在0~40 cm的土层中, 没有发生石漠化的生态系统有机碳储量达 16.91 kg m^{-2} , 每退化1级, 有机碳储量减少了一半左右, 到极度退化阶段(5级), 其有机碳储量只有 0.52 kg m^{-2} 。土壤有机碳储量不仅随着石漠化加剧而急剧降低, 而且集中储存在土壤表层, 因此, 任何引起表层水土流失的事件都将导致土壤有机碳储量明显减少。

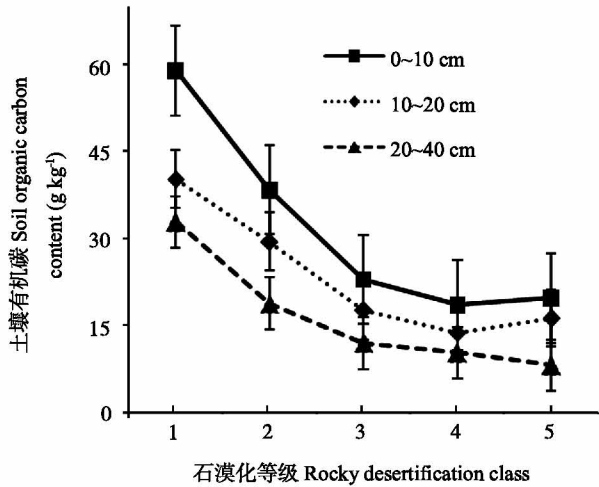


图 2 不同石漠化等级土壤有机碳含量的变化

Fig. 2 Changes in soil organic carbon content under different classes of rocky desertification

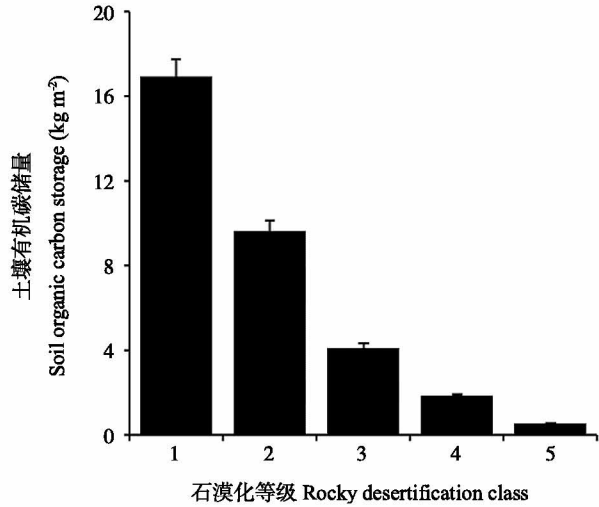


图 3 不同石漠化等级土壤有机碳储量的变化

Fig. 3 Changes in soil organic carbon storage under different classes of rocky desertification

2.3 土壤总碳与总氮

对所有土壤样品的统计分析显示,喀斯特地区土壤总有机碳与总氮含量如图 4 所示,具有显著的线性关系($y = 0.0717x + 0.161$, $R^2 = 0.84$)。土壤氮素水平对土壤碳固定具有正效应,氮素的缺乏将会限制土壤有机碳的固定,从而影响喀斯特地区的生态恢复。

2.4 土壤有机碳与土壤容重

对土壤有机碳普遍采用土壤容重和土壤有机碳的相关关系来推算,其经验公式为 $y = ae^{-bx} + y_0$ (式中, y 为土壤有机碳, x 为土壤容重, a 、 b 、 y_0 为经验参数)。我们把不同石漠化阶段的喀斯特生态系统土壤容重和有机碳按照上述方程进行拟合(图

5),对于自然发育的土壤(没有发生石漠化,1 级),两者高度相关(R^2 为 0.97),随着生态系统的受损(发生石漠化),两者关系逐渐降低,1、2 级和 1、2、3 级数据拟合的 R^2 分别为 0.91 和 0.75,再加入 4 级和 5 级的数据后,两者就不再相关了。

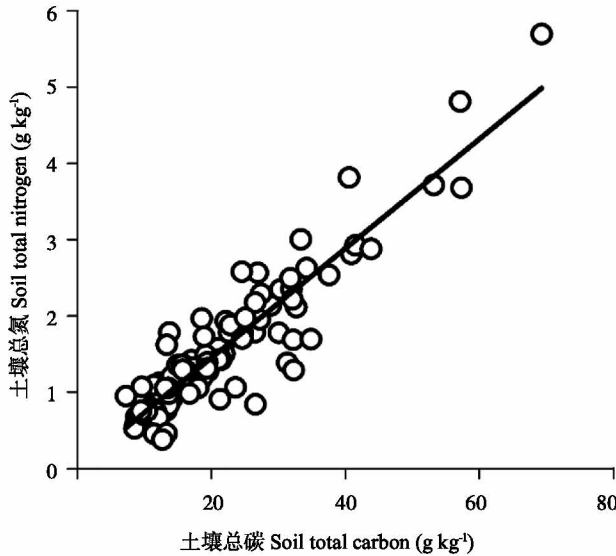


图 4 土壤总碳与土壤总氮的关系

Fig. 4 The relationship between soil total carbon and soil total nitrogen

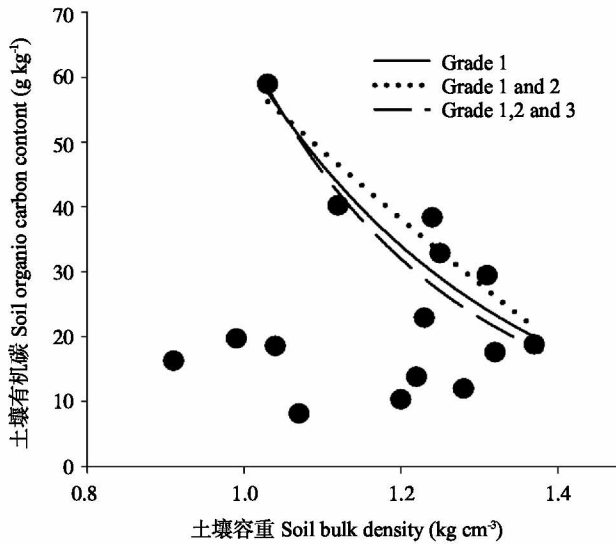


图 5 土壤容重与土壤有机碳含量的关系

Fig. 5 Relationship between soil bulk density and soil organic carbon

3 讨论

3.1 喀斯特石漠化过程土壤有机碳的去向

喀斯特生态系统石漠化是对不合理的人为干扰方式的响应,包括毁林开荒、陡坡垦殖、过度砍伐、烧灰积肥和石料开采等。植被覆盖层被破坏

后,土壤表层丧失了保护作用,在强烈的水蚀作用下,土壤的有机质和养分流失。土壤侵蚀造成有机碳大量流失,中国西北部的干旱半干旱农业区和牧区,风蚀导致的有机碳流失通量为 75 Tg C a^{-1} [11]。2005 年调查西南喀斯特石漠化面积达 $1.36 \times 10^5 \text{ km}^2$,每年新增面积达 3833 km^2 (1999–2005 年),即使新增加的石漠化地区为轻度石漠化(2 级),中国西南石漠化导致的有机碳流失通量的年增加量为 28 Tg 。相对于贮存在植被中的碳来说,贮存在土壤中的碳较为稳定,在全球碳循环中占有非常重要的作用 [12–13],因此,侵蚀所流失的有机碳的去向成为关注的焦点。目前普遍认为在以水蚀为主的流域土壤侵蚀过程中,侵蚀流失的有机碳并没有完全分解,而是有一部分堆埋在沉积区域,尽管沉积的区域面积很小 [14]。但对于中国西南喀斯特生态系统石漠化所导致的有机碳有多少分解到大气中,又有多少被堆埋还需进一步研究。

3.2 喀斯特石漠化过程土壤有机碳对生态恢复的限制作用

土壤是陆地生态系统的基础,土壤有机碳在土壤的形成和演化过程中起着重要的作用,是植物成活和生长的基础,而喀斯特石漠化导致了土壤有机碳严重流失,直接影响到植物对水和营养元素的吸收利用 [15–17],大大增加了生态恢复的难度。土壤的有机碳在土壤中不是孤立的,与养分元素有着密切的关系。大量的研究表明,土壤有机碳与土壤中的氮素有高度的依存关系 [18–19],在喀斯特生态系统也不例外。由于氮素是限制植物初级生产力的重要元素之一 [20],缺乏氮素的喀斯特石漠化生态系统难以积累生物量。另外,土壤有机质含量对土壤结构也有重要影响,在有机质含量较低的情况下不利于形成较好的团粒结构,稳定性差,使土壤有效水含量和抵御水土流失的能力降低 [21],这将使本来就受水分胁迫的喀斯特石漠化生态系统进一步恶化。

3.3 利用土壤容重推算土壤有机碳的可靠性探讨

陆地生态系统地下部分是一个巨大碳库。在全球陆地生态系统的总碳贮量 (2500 Gt) 中, 1 m 厚的土壤中的碳贮量就有 2000 Gt ,是植被碳贮量 (500 Gt) 的 4 倍 [22]。陆地生态系统地下部分碳的巨大储量,其微小的变化将带来显著的影响。土壤有机碳关系到大气中 CO_2 的浓度问题,其变化量一直

是研究者关注的问题,已有大量的对于中国及世界其它地区土壤有机碳储量分布和动态趋势的研究报道 [17,23–24]。目前对于土壤容重和土壤有机碳的相关关系的可靠性及其应用范围探讨的较少。根据上述土壤容重和有机碳结果可见,在生态系统受损时,整个系统具有随机性,系统主要以外部控制为主,因此整个系统呈现不稳定性,各部分的相互关系呈无序状态。这就验证了生态学中所谓的“先锋世界观” [25] 和盖亚假说 (Gaia hypothesis),认为稳定的生态系统都具有相应的内部环境,并且内部环境越稳定,则意味着这个系统越成熟和健康,反过来,这个结论也是成立的。很明显,对于自然发育的生态系统,利用土壤容重推算土壤有机碳是可行的,但对于受损的生态系统,通过这种方式难以取得准确的结果,大大增加了预测土壤有机碳储量分布和动态趋势的不确定性,这还有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] Yan J H, Zhou G Y, Zhang D Q, et al. Changes of water content, organic matter and exchangeable cation in soil along with a forest successional gradient in Southern China [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 397–405.
- [2] Deng P Y(邓培雁). The present situation of various injured seed plants in Guizhou Karst area and countermeasures [J]. *Guizhou Norm Univ (Nat Sci)* (贵州师范大学学报:自然科学版), 2000, 18(3): 17–21. (in Chinese)
- [3] Yuan D X(袁道先). Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources [J]. *Quatern Sci* (第四纪研究), 2001, 21(3): 223–232. (in Chinese)
- [4] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185–190.
- [5] Schlesinger W H. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change* [M]. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 1997: 1–443.
- [6] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle [J]. *Glob Change Biol*, 1995, 1(1): 77–91.
- [7] Chen Q W(陈起伟), Xiong K N(熊康宁), Lan A J(蓝安军). Analysis on karst rocky desertification in Guizhou based on “3S” [J]. *Carsol Sin* (中国岩溶), 2007, 26(1): 37–42. (in Chinese)
- [8] Zhang X B(张信宝), Wang S J(王世杰), He X B(贺秀斌), et al. A preliminary discussion on the rocky desertification classification for slope land in karst mountain areas of Southwest China [J]. *Earth Environ* (地球与环境), 2007, 35(2): 188–192. (in Chinese)
- [9] Liu G S(刘光崧), Jiang N H(蒋能慧), Zhang L D(张连第), et al. *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil*

- Profiles [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 1-166. (in Chinese)
- [10] Ni J P (倪九派), Yuan D X (袁道先), Xie D T (谢德体), et al. Estimation of soil organic carbon storage and the characteristic of carbon spatial distributions in karst area, Chongqing, China [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, 29(11): 6292-6301.
- [11] Yan H, Wang S Q, Wang C Y, et al. Losses of soil organic carbon under wind erosion in China [J]. *Glob Change Biol*, 2005, 11(5): 828-840.
- [12] Pendall E, Bridgman S, Hanson P J, et al. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: A discussion of observations, measurement methods, and models [J]. *New Phytol*, 2004, 162(2): 311-322.
- [13] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated carbon dioxide stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in terrestrial ecosystems: A Meta-Analysis [J]. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [14] McCarty G W, Ritchie J C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems [J]. *Environ Pollut*, 2002, 116(3): 423-430.
- [15] Jenkinson D S, Andrew S P S, Lynch J M, et al. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil [J]. *Philosoph Transact Biol Sci*, 1990, 329(1255): 361-368.
- [16] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecol Appl*, 2000, 10(2): 423-436.
- [17] Singh S K, Singh A K, Sharma B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India [J]. *J Arid Environ*, 2007, 68(3): 408-421.
- [18] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [19] Schipper L A, Percival H J, Sparling G P. An approach for estimating when soils will reach maximum nitrogen storage [J]. *Soil Use Manag*, 2004, 20(3): 281-286.
- [20] Harrington R A, Fownes J H, Vitousek P M. Production and resource use efficiencies in N- and P-limited tropical forests: A comparison of responses to long-term fertilization [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(7): 646-657.
- [21] Cao J H (曹建华), Yuan D X (袁道先), Pan G X (潘根兴). Some soil features in Karst ecosystem [J]. *Adv Earth Sci* (地球科学进展), 2003, 18(1): 37-44. (in Chinese)
- [22] IPCC. Land Use, Land Use Change, and Forestry [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-51.
- [23] Ogle S M, Breidt F J, Eve M D, et al. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for US agricultural lands between 1982 and 1997 [J]. *Glob Change Biol*, 2003, 9(11): 1521-1542.
- [24] Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, et al. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s-1980s [J]. *Tellus Ser B Chem Physic Meteorol*, 2003, 55(2): 416-427.
- [25] Odum E P. The strategy of ecosystem development [J]. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.