

土地利用变化影响土壤碳库特征与土壤呼吸研究综述

张 涛^{1,2}, 李永夫^{1,2}, 姜培坤^{1,2}, 周国模^{1,2}, 刘 娟^{1,2}

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 土地利用变化对生态系统碳循环和全球气候变化具有非常显著的影响。土壤碳库容量为大气碳库的 2~3 倍, 土壤呼吸过程是土壤圈碳流入大气圈的主要途径。研究土地利用变化对土壤碳库与土壤呼吸速率的影响对于揭示生态系统对土地利用变化的响应机制及科学估算区域生态系统的碳汇功能具有十分重要的意义。综述了自然林地、人工林地、农业用地和草地等 4 种土地利用方式相互转化对土壤碳储量的影响, 较详细地分析了土地利用变化对不同活性碳库(主要包括微生物量碳、水溶性碳、易氧化碳等)的影响, 探讨了土壤呼吸速率对土地利用变化的响应及其机制, 最后对该方向今后的研究重点做了展望。参 69

关键词: 土壤学; 土地利用变化; 土壤碳库; 活性碳; 土壤呼吸; 温室效应; 综述

中图分类号: S171 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2013)03-0428-10

Research progresses in the effect of land-use change on soil carbon pools and soil respiration

ZHANG Tao^{1,2}, LI Yongfu^{1,2}, JIANG Peikun^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, LIU Juan^{1,2}

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejinag Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Land use change has a very significant impact on the carbon cycling in ecosystems and global climate change. Soil carbon storage has the 2–3 times capacity of the atmospheric carbon pool, and the process of soil respiration is regarded as the main pathway to the emission of pedosphere carbon into the atmosphere. Study on the effects of land use change on soil carbon pools and soil respiration rate would have a very important significance for revealing the response of ecosystems to land-use change and associated mechanisms, and scientific estimates of regional ecosystem carbon sequestration. The effects of land-use change among four land-use types (natural woodland, plantation land, agricultural land and grassland) on the soil carbon storage were reviewed in this paper. The effects of the above-mentioned land-use change on different labile carbon pools, including microbial biomass carbon, water-soluble carbon, readily oxidizable C, were analyzed in detail. Additionally, the response of soil respiration rate to the land-use change and associated mechanisms was investigated, and the focuses in this field for future research were put forward. [Ch, 69 ref.]

Key words: soil science; land-use change; soil carbon pool; activated carbon; soil respiration; greenhouse effect; review

全球变暖引起的极端天气等正严重地威胁着人类的生存环境。近百年来, 全球地面平均温度已升高

收稿日期: 2012-04-23; 修回日期: 2012-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31170576); 浙江省科学技术重点项目(2011C12019); 浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50030); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2007FR040)

作者简介: 张涛, 从事森林土壤学研究。E-mail: hywjzt@163.com。通信作者: 李永夫, 副教授, 博士, 从事森林生态系统碳循环研究。E-mail: yongfuli@zafu.edu.cn

了0.3~0.6℃, 大气二氧化碳体积分数同时增加了近25%, 而且增加的速率仍在持续上升^[1]。许多学者研究表明, 全球气候变暖的现象与二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体的浓度升高有密切关系^[2]。为了遏制这类温室气体的继续增加, 世界各国已经制定了一系列措施, 《京都议定书》等国际条约的签订标志着世界各国对碳循环全球性合作研究的开始^[3]。大气中的二氧化碳体积分数的升高主要是由于人口剧增、化石燃料的燃烧、森林砍伐、土地利用方式改变等一系列社会活动引起的, 其中土地利用方式对碳释放的影响尤为重要, 因为土壤中的碳的量是大气中的2倍, 土壤中的碳只要发生一点点变化, 就会对大气中的碳量造成巨大影响^[4], 而土地利用变化对陆地生态系统地上和地下的碳储量的影响是最直接最显著的, 尤其是土地利用方式改变的初期(<10 a), 土壤中碳量的变化最为显著^[5]。土地利用方式改变的作用机制主要是通过改变地表植被的覆盖和土壤的透气性, 从而改变土壤中包括我们传统所知的土壤有机质的量, 以及近几年深入发现的微生物碳、易氧化碳、水溶性碳等的碳库结构, 导致了土壤呼吸速率的变化^[6-7]。土地利用与土地覆盖的转变(LUCC)涉及到一系列复杂的社会、生态学和地质学问题, 有许多关于这方面研究提到社会经济利益是土地利用转变的原动力, 但依然没有一个明确的认识, 也没有有效的指导方针来缓和土地利用方式转变带来的危害^[8-9]。如果光从表面对碳排放进行控制, 容易对碳循环产生不良影响, 固碳的效应也不会太稳定, 必须深入对土壤碳结构和碳循环机制进行研究, 从而制定出一套完整可靠的固碳措施。笔者主要阐述了自然林地、人工林地、草原、农用地这4种类型土地相互转变后对土壤碳库的影响, 还对部分土地类型深入分类解析, 从而为合理利用土地资源和减缓全球温室效应提供理论依据。

1 土地利用方式改变对土壤有机碳的影响

1.1 自然林地改造成其他类型土地

森林是良好的天然土壤碳库, 在调节气候、涵养水源、固定土壤碳库等方面有重要功能, 全球森林面积约为 4.161×10^9 hm², 森林生态系统的生物量约占整个陆地生态系统生物量的90%^[1]。森林碳库储量约为348 Gt碳, 森林土壤中碳库储量约为478 Gt碳(1 m以上土层)^[10], 但由于人类对森林资源的砍伐, 以及将自然林地转化成人工林和农田后, 导致森林土壤碳库遭到破坏, 二氧化碳等温室气体被大量释放到大气中, 全球约有1/5的人为二氧化碳排放归咎于森林转变成农业用地^[11]。据统计, 在1999-2002年期间, 人类砍伐的森林数目相当于从森林生态系统中释放了 $1.0 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^7$ t的碳^[12], 而当人类将森林改造成其他土地利用类型后, 土壤有机碳储量将会下降25.6%~51.2%^[13], 其中以农业用地的下降幅度最大, 草地次之, 人工林地降低最少^[14-15], 由此可以得出结论: 自然林地改造成农业用地后, 土壤的碳储量的流失最大, 而改造成人工林地的流失最少。从长远的角度来看, 自然林改造成人工林地的情况也不容乐观, 两者虽然同属于森林生态系统, 可人工林受人类活动影响强烈, 在从自然林地改造而来的初期, 由于大量的施肥会增加土壤碳库储量, 所以有机质下降幅度不大, 但人类经营活动改变凋落物、根系的理化性状以及分布, 从而刺激凋落物的分解, 加速二氧化碳的释放, 加上对人工林的采伐, 将碳素大量带离森林土壤, 会造成人工林土壤有机碳储量的下降^[16]。

1.2 农田改造成其他类型土地

农业用地不仅可以是温室气体的主要排放源, 也可以是温室气体的汇聚点, 农业用地对大气中二氧化碳体积分数的影响十分重要, 通过农业用地重新吸收和固定碳的研究已经受到国内外学者的广泛关注^[17]。从总体上说, 林地碳储量大, 农业用地较差, 但农业用地的土壤碳库与种植作物和季节变化有显著关系, 不同类型的农用地转变成人工林地时, 有机质的变化情况也不同。以王健波等^[18]等的研究为例, 冬小麦 *Triticum aestivum* 和蔬菜地与柑橘 *Citrus reticulata* 地进行比较, 发现有机质状况为冬小麦地 > 柑橘地 > 蔬菜地, 同样是农业用地, 蔬菜地的有机质低于人工林, 但小麦地却高于人工林, 作者认为其中的主要原因是冬小麦地采用水稻 *Oryza sativa*-小麦轮作和实施秸秆还田的管理方式增加土壤有机质, 而柑橘地则是管理过程中施用有机肥料较多, 常年不进行翻耕, 有利于有机物的积累, 与此相反的是蔬菜地在管理过程中频繁翻耕, 破坏了土壤理化性状和微生物生存环境, 土壤通气性提高了, 必然加速有机质的分解速率。马群等^[19]的研究却与王健波等^[18]相反, 他发现蔬菜地的碳含量高于果园, 但他也提到了, 该实验中的蔬菜地是处于一种强度较高的集约经营方式之下, 农民大量施用有机肥和微生物肥, 改善了

土壤环境,所以才导致较高的有机质。由此可见,经营管理方式对农业用地土地利用方式改变的结果有着重要影响。

前面已经提到林地改造成农业用地,土壤有机质的下降,以及受到管理方式和种植类型的影响会对结果产生影响,但综合诸多文献,大部分农业用地改造成林地会增加土壤中有有机质。不过,在改造的初期,有机质反而会下降。史利江等^[20]研究表明,上海水田改造成林地后,在接下来的4~5 a内,林地土壤有机碳、总氮以及有机碳密度等均低于相邻的水稻田,从短期看,人工林地土壤有机碳的汇集效应处于一个较低水平。与此相似,孟静娟等^[21]将水田和橘园作为研究对象,研究了土壤的有机碳、碳库的分解速率、缓性碳库及惰性碳库。结果表明:水田的碳高于橘园;水田有机碳的分解速率比橘园高;水田的缓性碳库与惰性碳库均高于桔橘土壤,水稻田具有更好的固碳能力。因此,在农田改造成林地的最初几年,林地的碳汇能力比农田低。

1.3 草地改造成其他类型土地

草地面积辽阔,全球约为 3.42×10^9 hm²,约占陆地总面积的40%^[22-23]。陆地生态系统的碳储量有46%存在于森林,23%存在于热带以及温带的草原,草原生态系统是仅次于森林的碳储存系统^[24],但目前草原生态系统面临着过度放牧、过度开发成农田等一系列问题。

人为开垦是影响草原有机碳的主要原因。当草地变成农田后,土壤温度、湿度和通透性均发生变化,有机质矿化率增加,导致土壤有机碳被释放,一般会损失土壤中碳总量的30%~50%,再加上某些不适当的耕作措施,还易导致土壤侵蚀^[2]。以农牧交错带为例,20世纪70年代,农牧交错区大批天然草地被开垦为农田,开垦导致土壤有机质暴露在空气中,加速了有机质的分解,因此,被改造的草地0~50 cm层有机质含量远低于未被扰动的草地^[25]。不过,改造后的农田经过长期施肥、秸秆还田和免耕措施后,可以显著提高土壤有机质,主要发生0~10 cm的表层^[26]。

2 土地利用方式改变对土壤活性碳库的影响

土壤活性碳是指在一定的时空条件下,受植物和微生物影响强烈,具有溶解性,在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、易分解、易矿化的那一部分土壤碳素,能反映土壤的微小变化,可用微生物量碳、水溶性碳、易氧化碳等指标来表征^[27]。

2.1 土壤微生物量碳

土壤微生物能分解动植物残体,促进有机质分解转化,它的含量高低不仅能反映土壤生物化学的强度和方向,还对土壤的质量环境非常敏感^[28],而且土壤微生物对土壤团聚体的形成、稳定和分解有重要作用^[29]。一般而言,微生物生存的环境越适宜,土壤中微生物的种类数目就多,管理方式对微生物多样性的影响十分突出^[30]。作为土壤活性碳的一部分,微生物碳量往往可以指示土地固碳能力的强弱。

土壤中微生物总量具体表现为自然林地最高,草地最低,人工林和农业用地相似,并根据地表栽植树种和作物的类型,2种土地类型的微生物碳量呈现出不同高低^[31-32]。自然林地的微生物碳处于高水平,是因为它受人为活动影响小,每年有大量的凋落物回归土壤,为微生物提供了丰富的碳源,同时凋落物也有利于为微生物提供较好的生存环境,而农业受人类经营活动影响强烈,尤其是稻田类型,由于干湿交替等原因使得微生物难以保持高的生物量^[33]。自然林地转变成其他类型的土地利用方式后,土壤中微生物碳、氮、磷显著下降^[34],在改造的初期,农业用地中的微生物碳下降幅度最大^[35]。以张于光等^[36]研究为例,当原始冷杉林*Abies faxoniana*改造成人工林和农田后,农田的微生物碳量比自然林和改造20 a的人工林低83%和52%,但从长远的角度看,农业用地的微生物碳更有上升潜力,这是因为农业用地类型中的秸秆还田的经营措施增加了微生物量碳、氮,还能提高土壤脲酶活性。稻田和其他作物轮作以及人为施加肥料增加了碳源,有利于微生物大量繁殖,且水旱轮作能提高微生物活性,而人工林则由于集约经营,化肥的过度使用,不利于微生物生长。人工林的微生物量碳量随着栽植年限的增加而下降^[37-38],农田的微生物熵显著大于改造成的人工林地,表明改造后土壤微生物碳的转化效率降低,农田具有较高的生物量维持能力,显著地提高了土壤有机碳和土壤活性碳,更具固碳潜力^[39]。

2.2 土壤水溶性碳

土壤水溶性碳是指能通过 0.45 μm 筛孔，可溶于水或者酸碱溶液，由一系列结构不同的有机物质组成的混合碳素，主要来源于凋落物的分解、土壤微生物和植物根系的分泌物。由于土壤水溶性碳具有一定的溶解性，受到植物和微生物的活动强烈，在土壤中移动快、不稳定、易分解、易氧化^[40]。

自然林地的水溶性碳受季节变化影响显著，并且温暖季节的水溶性碳比寒冷季节低^[41]，自然林地土壤的总水溶性碳要高于人工林，而且水溶性碳占总有机碳比率从表层土到下层土，有明显升高趋势^[42]，自然林地改造成人工林和农田后，水溶性碳表现为自然林地 > 人工林地 > 农田，人工林的水溶性碳随着改造年份的增加而上升^[35]，这种下降主要是由于剩余的有机质的稳定性较强，以及土壤有机质输入量减少造成的^[43]，而天然草地改造成林 40 a 后，水溶性碳有所下降。这主要是因为人为活动影响了植被的类型和凋落物的分布^[40]，草地开垦成农田后，水溶性碳明显下降，而且随着耕地年数增加，减少的趋势更加明显^[43]，草地水溶性碳应该高于林地和农田。

2.3 土壤易氧化碳

土壤易氧化碳是土壤活性有机碳库的重要组成部分，能够为土壤中生物的生命活动提供动力，而且土壤中碳储量的变化主要发生在土壤中易氧化碳的部分，所以认为，易氧化碳可以指示土壤有机质的前期变化，可以衡量土壤有机质的敏感性^[44]。

自然林地与人工林的易氧化碳无显著差异，但有几种自然林和经济林的易氧化碳会显著超过其他林地，例如常绿阔叶林的易氧化碳高于针叶林和人工林，但它们都有一个共同点，易氧化碳占总有机碳的比率从表层到底层呈现下降明显趋势，与水溶性碳变化趋势相反^[42]。从总体上来看，农田的易氧化碳比大部分林地略低，但在某些较热的月份，易氧化碳甚至能超过部分林地。此外，也有研究表明，经济林土壤的易氧化碳显著高于其他林地和农田土壤^[45]。

3 土地利用方式改变对土壤呼吸的影响

土壤呼吸指的是土壤释放二氧化碳的过程，主要是由生物氧化有机物和根系呼吸产生，通过土壤呼吸作用向大气释放二氧化碳的过程，是全球碳循环中的关键过程之一。

3.1 土壤呼吸速率的影响因素

在自然条件下，影响土壤呼吸速率的主要有植物根系密度、土壤温度、水分含量和微生物数量等。目前，许多研究主要从温度、水分等方面对土壤呼吸的影响机制开展研究。土壤呼吸与温度之间有着显著相关性，一般表现为正相关关系。土壤温度对土壤呼吸的影响主要是通过增强土壤微生物的活性，加速土壤有机质的分解速率来增加土壤释放二氧化碳的体积分数，另外，温度升高还可以通过影响植物生长和生理活动来加强根系呼吸作用^[46]。不过温度对土壤呼吸的作用也不是一直促进。在温度较高时，升高温度反而会降低有机碳的分解作用^[47]。不同土壤类型、植被类型和气候特征使得土壤呼吸对温度的敏感性不同。目前，研究者们常用温度敏感系数 Q_{10} 来表示土壤温度的敏感性。在全球尺度上，基于气温产生的 Q_{10} 值的均值为 1.5^[48]。林地土壤温度敏感性具有较大的空间异质性，例如人工杨树 *Populus* 林土壤呼吸速率与地表温度的相关性比土壤 5 cm 处温度的相关性要高^[49]。而对于不同海拔的林地，土壤的温度敏感性还会随着海拔的升高而升高^[50]。季节性干湿交替也会干扰土壤对温度的敏感性，在旱季时，由于植物生理活动处于半休眠状态，对温度的变化更为敏感；在雨季时，植物生理活动处于高峰期，对温度的敏感性相对较弱，在雨季时，土壤微生物呼吸也是个一个高峰期。因此，温度变化对微生物土壤呼吸的影响也低^[51]。

土壤含水量与土壤呼吸的关系复杂，有正相关关系，也有负相关关系^[52]。土壤含水量不仅能影响生物的活性，还会影响气体的扩散，在高含水量和低含水量的情况下，生物活性会降低，而含水量高的土壤中，氧气的扩散速率会降低^[53-54]。因此，当土壤含水量较低时，水分是土壤呼吸的限制因子，在一定范围内，土壤呼吸随着土壤含水量的升高而升高；当含水量较高时，水分也是限制因子，含水量的增加会减弱土壤呼吸的作用^[55]。

3.2 环境因素对土壤微生物呼吸的影响

土壤微生物活动对土壤呼吸的影响最为关键，在 pH 值、土壤湿度、温度等环境因素的影响下，微

生物呼吸活动变化强烈。pH 值对微生物的生长繁殖有明显影响,微生物呼吸会随着 pH 值的上升而减少,而随着 pH 值的降低而增加^[56],Miloslav 等^[57]的研究表明,在酸性硫酸盐土壤中的微生物群落有利于土壤温室气体的排放。土壤湿度直接影响微生物的生理过程,在干旱土地中,由于水分的缺失,土壤微生物活动微弱,土壤呼吸不强烈,降水后,土壤干旱情况缓解,土壤微生物量和土壤呼吸骤升,但超过一定量后,土壤微生物呼吸反而受到抑制,又会逐步下降^[58]。温度几乎影响微生物呼吸的全部过程,研究表明,微生物的土壤呼吸在 23 ℃ 的时候最大^[59]。

3.3 土地类型转变对土壤呼吸的影响

自然林地土壤呼吸占了生态系统呼吸总量的 60%~90%,是全球碳循环的关键部分。同时,森林还通过光合作用降低了土壤向大气中排放二氧化碳的速率,可以将碳储存起来^[60]。目前,森林生态系统面临过度砍伐以及将森林改造成其他土地利用类型等问题。自然林地改造成人工林后,土壤呼吸速率不会发生显著变化。然而,当改造后的人工林采取集约经营措施后,土壤呼吸一般呈显著增加趋势^[61]。当自然林地改造成农业用地后,土壤呼吸速率显著高于自然林和人工林,这主要是因为翻耕方式影响了它的土壤呼吸^[62]。对于农业用地而言,免耕能显著增加呼吸温度敏感性,在高温季节显著提高土壤呼吸,低温则显著降低土壤呼吸,而少耕则能有效降低土壤的温度敏感性,在高温季节降低了土壤呼吸速率,低温季节提高了土壤呼吸速率,受季节影响显著^[63-64],但由于植株种类和植株生长期的不同,也会造成免耕对土壤呼吸的影响不同。如 Franzluebbbers 等^[65]的研究结果表明:在大豆 *Glycine max* 和高粱 *Sorghum vulgare* 的生育期,免耕使土壤呼吸速率高于传统耕作方式;但在小麦 *Triticum aestivum* 的生育期,免耕则会降低土壤呼吸的速率。森林资源被改造成畜牧场时,虽然草地也是优秀的碳汇,但畜牧场受人为作用强,对碳的储存能力不及自然草地。在全球范围的分析表明,森林改造成草地后,将促使土壤呼吸平均增加 20% 左右^[66],根据 Fearnside 等^[67]的研究结果,在巴西亚马逊河流域,土壤深度 8 m 以内,土壤含碳量多达 136 Gt,其中表层土壤含碳为 47 Gt,但迅速转化为畜牧场后,平均土壤有机碳净释放碳 8.5 t·hm⁻²(其中 3% 的排放量是来自 1 m 以下深度的土层)。消失掉的碳量相当于整个巴西化石燃料每年排放量的 20%,这一情况使得草地这个重要的碳库受到干扰。草地开垦为农田后土壤呼吸增加,主要是由于开垦引起土壤有机碳释放,以及农垦使得土壤温湿环境得到改善,加快有机质的分解^[68],草地开垦为农田后,原有 30%~50% 的土壤有机碳总量损失,大部分是由土壤呼吸造成的^[69]。自然林、人工林、农用地、草原等 4 种土地类型中,农田的土壤呼吸速率最高。

4 总结与展望

自然林地具有高碳储量,土壤呼吸适中,凋落物为土层微生物提供了良好的生存环境,微生物种类繁多,微生物碳量高,具有明显的碳汇功能,在全球碳循环中的固碳过程具有重要作用。目前,面临着大批森林资源被改造成其他土地类型、土壤碳储量剧减的危险局面。当自然林地改造成人工林地后,除去部分强度集约经营经济林外,两者土壤中有机质量、易氧化碳量和土壤呼吸速率变化较小。在短期的水平上看,人工林似乎是与自然林地一样的碳汇,但从长远角度看不利于固碳。自然林地改造成农业用地是土地利用方式改变中最常见的现象,随着改造的完成,农田土壤中的有机质均显著降低,这对于土壤的碳汇功能来讲是不利的。农业用地土壤碳库受作物、季节、耕作措施等因素影响严重,因此,要根据当地的实际气候和作物种类采取相应措施,才能将农业用地的碳汇功能得到有效体现。近几年来,鉴于人工林的经济效益,大批农业用地被改造成人工林地,土地类型的变化大体上有利于土壤固碳,但在农田改造成人工林的初期,土壤的碳汇功能呈一定的下降趋势,随着人工林栽植年限的增加,土壤的碳汇功能才显著增加。草地是仅次于自然林地的良好天然碳库,但当自然林地改造成像畜牧场这样受人为活动影响强烈的土地类型时,草地表层土壤呼吸强烈,以及草地开垦为农田时,土壤呼吸也会大幅增加。

科研人员已经对土地利用变化对碳库特征的影响做了不少研究,这些研究明确了土壤碳库在全球变暖中的影响,增加了对土壤碳库的认识,但仍然存在许多不足之处。如,有许多学者研究林地、草地转变成农田的状况,却鲜有研究退耕还林后,土壤碳库的具体变化。在退耕还林的碳汇功能方面基本呈空白状态,希望日后要加强此方面的研究。此外,人工林和草原虽然对碳循环的作用不明显,此方面文献较少,但有部分人工林地的碳储量显著高于一些天然林地和农田土壤,然而其机制还需要进行深入系统

研究。当然由于人工林系统与农田系统一样,人为干扰非常频繁,在碳库与土壤呼吸特征的研究过程中,需要注意方法学研发的问题。

参考文献:

- [1] 周剑芬, 管东生. 森林土地利用变化及其对碳循环的影响[J]. 生态环境, 2004, **13** (4): 674 - 676.
ZHOU Jianfen, GUAN Dongsheng. Change in the use of forest land and its impact on the carbon cycling [J]. *Ecol Environ Sci*, 2004, **13** (4): 674 - 676.
- [2] 刘春梅. 土地利用变化对土壤碳库的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, **38** (31): 17479 - 17481, 17528.
LIU Chunmei. Effect of land use change on the soil organic carbon storage [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2010, **38** (31): 17479 - 17481, 17528.
- [3] 欧阳婷萍, 张金兰, 曾敬, 等. 土地利用变化的土壤碳效应研究进展[J]. 热带地理, 2008, **28** (3): 203 - 208.
OUYANG Tingping, ZHANG Jinlan, ZENG Jing, et al. Advances in the study of soil carbon effect of land-use change [J]. *Trop Geog*, 2008, **28** (3): 203 - 208.
- [4] ROUNSEVELL M D A, REAY D S. Land use and climate change in the UK [J]. *Land Use Policy*, 2009, **26** (s): 160 - 169.
- [5] PAUL K I, POLGLASE P J, NYAKUENGAMA J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **168** (1/3): 241 - 257.
- [6] 梁巍, 岳进, 吴劫, 等. 微生物量生物量 C, 土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田甲烷排放 [J]. 应用生态学报, 2003, **14** (12): 2278 - 2280.
LIANG Wei, YUE Jin, WU Jie, et al. Seasonal variations of soil microbial biomass, respiration rate and CH₄ emission in black earth rice fields [J]. *J Appl Ecol*, 2003, **14** (12): 2278 - 2280.
- [7] BATLLE-AGUILAR J, BROVELLI A, PORPORATO A. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change [J]. *Agron Sustain Develop*, 2011, **31** (2): 251 - 274.
- [8] DARLA K M, DANIEL M. Issues in spatially explicit statistical land-use/cover change(LUCC) models: examples from western Honduras and the Central Highlands of Vietnam [J]. *Land Use Policy*, 2007, **24**: 521 - 530.
- [9] DON A, SCHUMACHER J, FREIBAUER A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks-a meta-analysis [J]. *Global Change Biol*, 2011, **17** (4): 1658 - 1670.
- [10] BOLIN B, SUKUMAR R, WATSON R T, et al. *Land-Use Change, and Forestry Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. London: Cambridge University Press, 2000: 23 - 51.
- [11] POPP A, KRAUSE M, DIETRICH J P, et al. Additional CO₂ emissions from land use change-forest conservation as a precondition for sustainable production of second generation bioenergy [J]. *Ecol Econ*, 2012, **74**: 64 - 70.
- [12] ASNER G P, KNAPP D E, BROADBENT E N, et al. Selective logging in the Brazilian Amazon [J]. *Science*, 2005, **310** (5747): 480 - 482.
- [13] 杨玉盛, 谢锦升, 盛浩, 等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J]. 地理学报, 2007, **62** (11): 1123 - 1131.
YANG Yusheng, XIE Jinsheng, SHENG Hao, et al. The impact of land use/cover change on soil organic carbon stocks and quality in mid-subtropical mountainous area of southern China [J]. *Acta Geogr Sin*, 2007, **62** (11): 1123 - 1131.
- [14] 胡慧蓉, 马焕成, 王艳霞, 等. 土地利用方式变化对土壤养分与有机碳、氮的影响[J]. 中国水土保持, 2010 (11): 40 - 42.
HU Huirong, MA Huancheng, WANG Yanxia, et al. Influence of land use types to nutrients, organic carbon and organic nitrogen of soil [J]. *Soil Water Conserv China*, 2010 (11): 40 - 42.
- [15] 王芳, 肖洪浪, 苏永中, 等. 黑河中游边缘绿洲区不同土地利用方式对土壤质量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24** (7): 165 - 170.
WANG Fang, XIAO Honglang, SU Yongzhong, et al. Effects of land use type on soil quality in marginal oasis of the middle Heihe River [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2010, **24** (7): 165 - 170.
- [16] 郭锦山, 尤文忠, 张慧东, 等. 森林经营管理对人工林土壤碳累积的影响[J]. 辽宁林业科技, 2011 (4): 34 - 46.

- GUO Jingshan, YOU Wenzhong, ZHANG Huidong, *et al.* Effects of the forest management on the soil carbon accumulation of the plantation forest [J]. *J Liaoning For Sci Technol*, 2011 (4): 34 – 46.
- [17] 梁二, 蔡典雄, 代快, 等. 中国农田土壤有机碳变化: 土壤固碳潜力估算[J]. 中国土壤与肥料, 2010 (6): 87 – 92.
- LIANG Er, CAI Dianxiong, DAI Kuai, *et al.* Changes in soil organic carbon in croplands of China(II) estimation of soil carbon sequestration potentials [J]. *Soil Fert Sci China*, 2010 (6): 87 – 92.
- [18] 王健波, 李银生, 邱江平, 等. 崇明岛典型土地利用方式对土壤有机碳和酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19** (8): 1850 – 1854.
- WANG Jianbo, LI Yinsheng, QIU Jiangping, *et al.* Effects of typical land use patterns in Chongming Island on soil organic carbon and enzyme activity [J]. *Ecol Environ Sci*, 2010, **19** (8): 1850 – 1854.
- [19] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(11): 1834 – 1843.
- MA Qun, ZHAO Gengxing. Effects of different land use types on soil nutrients in intensive agricultural region [J]. *J Nat Resour*, 2010, **25** (11): 1834 – 1843.
- [20] 史利江, 郑丽波, 梅雪英, 等. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (9): 2279 – 2287.
- SHI Lijiang, ZHENG Libo, MEI Xueying, *et al.* Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Shanghai [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (9): 2279 – 2287.
- [21] 孟静娟, 史学军, 潘剑君, 等. 农业利用方式对土壤有机碳库大小及周转的影响研究 [J]. 水土保持学报, 2009, **2** (6): 144 – 148.
- MENG Jingjuan, SHI Xuejun, PAN Jianjun, *et al.* Effects of agricultural land use types on soil organic carbon pool size and turnover [J]. *J Soil Water Conserv*, 2009, **2** (6): 144 – 148.
- [22] LECAIN D R, MORGAN J A, SCHUMAN G E, *et al.* Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2002, **93** (1/3): 421 – 435.
- [23] CONANT R T, PAUSTIAN K. Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems [J]. *Global Biogeochem Cycl*, 2002, **16** (4): 1143 – 1151.
- [24] 赵娜, 邵新庆, 吕进英, 等. 草地生态系统碳汇浅析[J]. 草原与草坪, 2011, **31** (6): 75 – 82.
- ZHAO Na, SHAO Xinqing, LÜ Jinying, *et al.* Preliminary analysis of carbon sequestration of grassland ecosystem [J]. *Grassland Turf*, 2011, **31** (6): 75 – 82.
- [25] 徐敏云, 李培广, 谢帆, 等. 土地利用和管理方式对农牧交错带土壤碳密度的影响[J]. 农业工程学报, 2011, **27** (7): 320 – 325.
- XU Minyun, LI Peiguang, XIE Fan, *et al.* Response of soil organic carbon density to land-use types and management practices change in agro-pastoral zone [J]. *Trans CSAE*, 2011, **27** (7): 320 – 325.
- [26] 孟凡乔, 匡星, 杜章留, 等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳库及 ^{13}C 值的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31** (8): 1733 – 1739.
- MENG Fanqiao, KUANG Xing, DU Zhangliu, *et al.* Impact of land use change and cultivation measures on soil organic carbon (SOC) and its ^{13}C values [J]. *Environ Sci*, 2010, **31** (8): 1733 – 1739.
- [27] 李守中, 徐文程, 许鹏程. 闽侯郊区不同土地利用方式对土壤活性碳的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, **36** (31): 13733 – 13734, 13770.
- LI Shouzhong, XU Wencheng, XU Pengcheng. Effects of different land use on soil active c in Minhou suburb [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2008, **36** (31): 13733 – 13734, 13770.
- [28] 徐勤华, 肖润林, 向佐湘. 稻草覆盖、间作三叶草茶园土壤酶活性与养分的关系[J]. 生态学杂志, 2009, **28** (8): 1537 – 1543.
- XU Huaqin, XIAO Runlin, XIANG Zuoxiang, *et al.* Soil enzyme activities and their relations with soil fertility in a tea plantation under straw mulching and white clover intercropping [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (8): 1537 – 1543.
- [29] 毛艳玲, 杨玉盛, 崔纪超. 土地利用变化对土壤团聚体微生物量碳的影响[J]. 水土保持学报, 2009, **23** (4): 227 – 231.
- MAO Yanling, YANG Yusheng, CUI Jichao. Effects of land use on soil microbial biomass carbon in aggregates [J].

J Soil Water Conserv, 2009, **23** (4): 227 – 231.

- [30] 肖焯, 张于光, 张小全, 等. 土地利用变化对土壤肥力影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2007, **20** (1): 6 – 9.
- XIAO Ye, ZHANG Yuguang, ZHANG Xiaoquan, *et al.* Review on the influence of land use changes on soil fertility [J]. *World For Res*, 2007, **20** (1): 6 – 9.
- [31] 章家恩, 刘文高, 胡刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系[J]. 土壤与环境, 2002, **11** (2): 140 – 143.
- ZHANG Jiaen, LIU Wengao, HU Gang. The relationship between quantity index of soil microorganisms and soil fertility of different land use systems [J]. *Soil Environ Sci*, 2002, **11** (2): 140 – 143.
- [32] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (8): 4112 – 4118.
- XU Huaqin, ZHANG Jiaen, FENG Lifang, *et al.* Effects of different land use patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in Guangdong Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (8): 4112 – 4118.
- [33] 赵先丽, 吕国红, 于文颖, 等. 辽宁省不同土地利用对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (10): 1966 – 1970.
- ZHAO Xianli, LÜ Guohong, YU Wenying, *et al.* Effects of different land use patterns on soil microbial biomass carbon and nitrogen in Liaoning Province, China [J]. *J Agric Environ Sci*, 2010, **29** (10): 1966 – 1970.
- [34] SHARMA P, RAI S C, SHARMA R, *et al.* Effects of land-use change on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed [J]. *Pedobiologia*, 2004, **48** (1): 83 – 92.
- [35] 周程爱, 张于光, 肖焯, 等. 土地利用变化对川西米亚罗林土壤活性碳库的影响[J]. 生态学报, 2009, **29** (8): 4542 – 4547.
- ZHOU Cheng'ai, ZHANG Yuguang, XIAO Ye, *et al.* The effect of land use changes on soil active organic carbon pool in Miyaluo forest zone of the western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (8): 4542 – 4547.
- [36] 张于光, 张小全, 肖焯. 米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17** (11): 2019 – 2033.
- ZHANG Yuguang, ZHANG Xiaoquan, XIAO Ye. Effects of land use change on soil organic carbon and microbial biomass carbon in Miyaluo forest area [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17** (11): 2019 – 2033.
- [37] 王月容, 周金星, 周志翔, 等. 洞庭湖退田还湖区不同土地利用方式下土壤微生物数量与酶活性特征[J]. 生态学杂志, 2010, **29** (5): 910 – 916.
- WANG Yuerong, ZHOU Jinxing, ZHOU Zhixiang, *et al.* Soil microbial quantity and enzyme activity of different land-use patterns under converting polders back into wetlands in Dongting Lake area [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29** (5): 910 – 916.
- [38] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2008, **23** (2): 138 – 142.
- JIA Wei, ZHOU Huaiping, XIE Wenyan, *et al.* Effects of long-term returning corn stalks to the field combined with applying fertilizer in autumn on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil [J]. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2008, **23** (2): 138 – 142.
- [39] 王亮亮, 阮宏华, 王莹, 等. 围湖造田不同利用类型下土壤微生物量碳的特征[J]. 林业科技开发, 2010, **24** (4): 64 – 67.
- HUANG Liangliang, RUAN Honghua, WANG Ying, *et al.* Soil microbial biomass carbon in different land uses after reclaiming around the Taihu lake [J]. *China For Sci Technol*, 2010, **24** (4): 64 – 67.
- [40] 刘畅, 任艳林, 贺金生. 草地造林40年后土壤可溶性有机碳下降[J]. 北京大学学报, 2009, **45**(3): 511 – 518.
- LIU Chang, REN Yanlin, HE Jinsheng. Soil dissolved organic carbon decreased following 40-year grassland afforestation [J]. *Acta Sci Nat Univ Pekin*, 2009, **45** (3): 511 – 518.
- [41] WU Jiasen, JIANG Peikun, ZHANG S X, *et al.* Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China [J]. *Can J Soil Sci*, 2010, **90** (1): 27 – 36.
- [42] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学, 2005, **41** (1): 10 – 13.
- JIANG Peikun. Soil active carbon pool under different types of vegetation [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41** (1): 10 – 13.

- [43] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25** (3): 343 - 347.
ZHANG Jinbo, SONG Changchun, YANG Wenyan. Influence of land-use type on soil dissolved organic carbon in the Sanjiang Plain [J]. *China Environ Sci*, 2005, **25** (3): 343 - 347.
- [44] 张小磊, 何宽, 安春华, 等. 不同土地利用方式对城市土壤活性有机碳库的影响: 以开封市为例[J]. 生态环境, 2006, **15** (6): 1220 - 1223.
ZHANG Xiaolei, HE Kuan, AN Chunhua, *et al.* Influence of different land use on urban soil active organic carbon: a case study of Kaifeng City [J]. *Ecol Environ Sci*, 2006, **15** (6): 1220 - 1223.
- [45] 王莹, 阮宏华, 黄亮亮, 等. 围湖造田不同土地利用方式土壤活性有机碳的变化[J]. 生态学杂志, 2010, **29** (4): 741 - 748.
WANG Ying, RUAN Honghua, HUANG Liangliang, *et al.* Soil labile organic carbon of different land use types in a reclaimed land area of Taihu Lake [J]. *Chin J Ecol*, 2010, **29** (4): 741 - 748.
- [46] 张俊兴, 苏宏新, 刘海丰, 等. 3种温带森林土壤呼吸季节动态及其驱动机制[J]. 内蒙古农业大学学报, 2011, **32** (4): 160 - 167.
ZHANG Junxing, SU Hongxin, LIU Haifeng, *et al.* Seasonal dynamic and drive mechanism of soil respiration in three temperate forests [J]. *J Inner Mongolia Agric Univ Nat Sci Ed*, 2011, **32** (4): 160 - 167.
- [47] 黄耀, 刘世良, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13** (6): 709 - 714.
HUANG Yao, LIU Shiliang, SHEN Qirong, *et al.* Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (6): 709 - 714.
- [48] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, **44**(2): 81 - 99.
- [49] 马涛, 周金星. 滩涂人工杨树林土壤呼吸变化规律与环境因子的关系研究[J]. 水土保持研究, 2011, **18** (6): 31 - 41.
MA Tao, ZHOU Jinxing. Studies on soil respiration change and its relation with environmental factors in poplar plantation on beach land [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2011, **18** (6): 31 - 41.
- [50] 罗璐, 申国珍, 谢宗强, 等. 神农架海拔梯度上4种典型森林的土壤呼吸组分及其对温度的敏感性[J]. 植物生态学报, 2011, **35** (7): 722 - 730.
LUO Lu, SHEN Guozhen, XIE Zongqiang, *et al.* Components of soil respiration and its temperature sensitivity in four types of forests along an elevational gradient in Shennongjia, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (7): 722 - 730.
- [51] 吕文强, 王世杰, 刘秀明. 喀斯特原生林土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. 地球与环境, 2011, **39** (3): 313 - 317.
LÜ Wenqiang, WANG Shijie, LIU Xiuming. Dynamic variation of soil respiration and its controlling factors in natural karst forests [J]. *Earth Environ*, 2011, **39** (3): 313 - 317.
- [52] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, **23** (5): 972 - 978.
CHEN Quansheng, LI Linghao, HAN Xingguo, *et al.* Effects of water content on soil respiration and the mechanisms [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (5): 972 - 978.
- [53] ORCHARD V A, COOK F J. Relationship between soil respiration and soil moisture [J]. *Soil Biol Biochem*, 1983, **15** (4): 447 - 453.
- [54] REICHSTEIN M, BEER C. Soil respiration across scales: the importance of a model-data integration framework for data interpretation [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2008, **171** (3): 344 - 354.
- [55] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. 环境科学, 2011, **32** (8): 2185 - 2192.
CHEN Shutao, HU Zhenghua, ZHANG Yong, *et al.* Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem [J]. *Environ Sci*, 2011, **32** (8): 2185 - 2192.
- [56] KOWALENKO C G, IVARSON K C, CAMERON D R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 1978, **10** (5): 417 - 423.

- [57] MILOSLAV S, SEIJA V, VACLAV K, *et al.* Evidence of rich microbial communities in the subsoil of a boreal acid sulphate soil conducive to greenhouse gas emissions [J]. *Agric Ecos Environ*, 2011, **140** (1/2): 113 – 122.
- [58] 苏惠敏, 李叙勇, 欧阳扬. 土壤微生物量和土壤呼吸对降雨的响应[J]. 生态环境学报, 2011, **20** (10): 1399 – 1402.
SU Huimin, LI Xuyong, OUYANG Yang. Responses of soil microbial biomass and soil respiration to rainfall [J]. *Ecol Environ Sci*, 2011, **20** (10): 1399 – 1402.
- [59] 张滕, 饶良懿, 吕坤珑, 等. 土壤呼吸影响因素研究进展[J]. 广东农业科学, 2012 (8): 64 – 67.
ZHANG Teng, RAO Liangyi, LÜ Kunlong, *et al.* Some advance on effective factors of soil respiration [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2012 (8): 64 – 67.
- [60] 王西洋, 马履一, 贾忠奎, 等. 森林经营措施对土壤呼吸的影响机理[J]. 世界林业研究, 2012, **25** (1): 7 – 12.
WANG Xiyang, MA Lüyi, JIA Zhongkui, *et al.* Effect of forest management measures on soil respiration and its mechanism [J]. *World For Res*, 2012, **25** (1): 7 – 12.
- [61] LIU Juan, JIANG Peikun, WANG Hailong, *et al.* Seasonal soil CO₂ efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China [J]. *For Ecol Manage*, 2011, **262** (6): 1131 – 1137.
- [62] 王国兵, 郝岩松, 王兵, 等. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (增刊2): 73 – 79.
WANG Guobing, HAO Yansong, WANG Bing, *et al.* Influence of land-use change on soil respiration and soil microbial biomass [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (supp 2): 73 – 79.
- [63] 代快, 蔡典雄, 王燕, 等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究: 土壤温度对土壤呼吸速率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010 (6): 64 – 69.
DAI Kuai, CAI Dianxiong, WANG Yan, *et al.* Effects of different tillage on soil respiration rate of spring corn in the dryland of North China: effects of soil temperature on soil respiration rate [J]. *Soil Fertr Sci China*, 2010 (6): 64 – 69.
- [64] 牛新胜, 牛灵安, 张宏彦, 等. 玉米秸秆覆盖免耕对土壤呼吸的影响[J]. 生态环境, 2008, **17** (1): 256 – 260.
NIU Xinsheng, NIU Ling'an, ZHANG Hongyan, *et al.* Effect of no-tillage with maize straw mulching on soil respiration [J]. *Ecol Environ Sci*, 2008, **17**(1): 256 – 260.
- [65] FRANZLUEBBERS A J, HONS F M, ZUBERER D A. Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature and bulk density[J]. *Appl Soil Ecol*, 1995, **2**(2): 95 – 109.
- [66] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration, correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48** (1): 71 – 90.
- [67] FEARNSIDE P M, BARBOSA R I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia [J]. *For Ecol Manage*, 1998, **108**(1/2): 147 – 166.
- [68] 付刚, 沈振西, 张宪洲, 等. 草地土壤呼吸对全球变化的响应[J]. 地理科学进展, 2010, **20**(11): 1392 – 1399.
FU Gang, SHEN Zhenxi, ZHANG Xianzhou, *et al.* Response of grassland soil respiration to global change [J]. *Prog Geogr*, 2010, **20**(11): 1392 – 1399.
- [69] 吴志丹, 李跃森, 王义祥, 等. 经营措施对土壤碳储量和碳通量的影响[J]. 热带农业科学, 2008, **28**(1): 84 – 91.
WU Zhidan, LI Yuesen, WANG Yixiang, *et al.* Effects of human activities on soil carbon storage and soil respiration [J]. *Chin J Trop Agric*, 2008, **28**(1): 84 – 91.