

土壤呼吸测定方法述评与展望

闫美杰^{1,2}, 时伟宇^{2,3}, 杜盛²

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 土壤呼吸可运用微气象学法和气室法进行测定, 但气室法因其直接测定土壤表层释放的 CO_2 而最为引人注目。气室法按其测定原理又可分为封闭型气室法和开放型气室法。该文重点介绍各种气室法的原理、特点及应用条件, 并对近年来土壤呼吸研究方法的发展作了简要述评。过去常用的静态碱液吸收法、静态密闭气室法和动态密闭气室法逐渐被可自动开闭的动态气室法所代替, 以 LI-COR 公司最新推出的设备为代表, 预料将在今后一个时期成为该领域广泛使用的测定方法。由于土壤呼吸是全球碳循环的一个重要流通途径, 是大气 CO_2 的重要来源之一, 典型生态系统中土壤呼吸及其各组分对环境因子的响应特征将是一个重要研究课题, 这不仅关系到对生态系统生产量的正确测算, 而且关系到科学把握全球变化环境下 CO_2 的排放动态。

关键词: 土壤呼吸测定; 气室法; 碳循环

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0148-05

Review and Prospect on the Methods of Soil Respiration Measurement

YAN Mei jie^{1,2}, SHI Wei yu^{2,3}, DU Sheng²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil respiration can be measured by two types of methods, i. e., micrometeorological method and chamber method. Chamber method has drawn much attention as the CO_2 efflux from soil surface is measured directly by the technique. There are closed chamber and open chamber, both of which can be further divided into several kinds. In this paper, we mainly presented the principles, specialties, and application requirements for various chamber methods, and briefly commented on the development of soil respiration measurement in recent years. The static alkali absorption method, static closed chamber method and dynamic closed chamber method, which were widely used in the past, tend to be replaced by automatic open/closed chambers. It is expected that the newly developed automatic chambers, such as those manufactured by LI-COR, will be commonly used in the coming years. As soil respiration is one of the main pathways in the global carbon cycle and contributes to an important source for atmospheric CO_2 , the responses of soil respiration components to environmental factors in typical ecosystems will be extensively investigated. These researches will contribute not only to the calculation of ecosystem production, but also to the monitoring of CO_2 emission dynamics under the condition of global changes.

Key words: soil respiration measurement; chamber method; carbon cycle

随着全球气候变化对人类生存环境和经济发展的影响日益加剧, 地球温暖化已成为人类面临的重大环境问题^[1]。而大气 CO_2 浓度的升高被广泛认为是导致这一问题的主要原因^[2]。因此, 近年来对生态系

统的碳固定与碳排放的研究成为生态与环境科学以及社会经济学关注的热点。

土壤是全球陆地生态系统中最大的碳库, 它储存的有机碳总量约为 1 500 Pg, 是植被储碳量(500~

600 Pg) 的 2~3 倍, 大气储碳量(750 Pg) 的 2 倍多^[3]。每年因土壤呼吸向大气释放的 CO₂ 约占大气 CO₂ 的 10%^[4], 成为大气 CO₂ 的重要碳源。正因为土壤呼吸的高 CO₂ 释放量, 它的细微变化便有可能引起大气 CO₂ 浓度的明显改变^[5]。土壤有机碳的动态变化, 将直接影响全球的碳平衡。为此, 在研究全球规模的碳收支时, 对土壤中 CO₂ 的释放过程应寄予极大的关注^[6]。土壤呼吸的精确测定也成为研究生态系统碳循环和地球温暖化的关键问题之一。

在陆地生态系统的碳循环中, 植物通过光合作用固定大气中的 CO₂, 同时又通过土壤呼吸将土壤中的碳素以 CO₂ 的形式释放到大气中。植物的光合作用一直是植物生理学和生态学的重要研究内容, 利用直接和间接的测定方法, 可以从叶片、植株和群落等尺度上估算植被对 CO₂ 的固定和生产力。近年来, 利用卫星遥感技术, 基于植物表层对放射的吸收与反射等特性, 以监测植被表面的温度变化为途径, 可从大尺度范围推测植物对 CO₂ 的固定和初级生产力^[7]。尽管土壤呼吸也与温度有关^[8-9], 但是土壤呼吸放出的 CO₂ 源于土壤表面和土壤中, 遥感技术等大尺度的研究方法难以适用。为此, 在对土壤呼吸的研究中, 只能以各种植被为对象, 分别进行研究, 以此向外扩展。

土壤呼吸(Soil respiration)是指土壤产生和向大气释放 CO₂ 的现象。这些 CO₂ 来源于植物地下部(根、根茎等)的呼吸(Root respiration)和土壤中的从属营养生物(动物、土壤微生物等)进行的有机物分解(Heterotrophic respiration)^[10]。对土壤呼吸的测定方法虽然有很多, 但每一种方法都存在着不同程度的缺陷。本文将土壤呼吸的各种测定方法进行比较, 分析各自的特点及存在的问题, 并对其应用作一定的评述与展望。

1 土壤呼吸测定方法的分类

随着科学技术的不断发展, 土壤呼吸的测定方法从最早单一的化学方法, 到目前包括化学、物理学和生态学的多方位、多角度的方法, 一直在不断地完善、发展中。在诸多测定方法中, 大致可分为两大类, 一类是微气象学法, 另一类是气室测定法。

1.1 微气象学法

严格地讲, 该方法不能够准确测定土壤呼吸, 它测定的是群落整体的 CO₂ 动态变化, 包括土壤层和植被地上层两部分。经过其它手段进行测算, 可以估算土壤呼吸的 CO₂ 贡献率。微气象学的代表方法是涡度相关法, 它根据微气象学原理在植被层上方直接测量 CO₂ 的涡流传递速度, 从而计算出植物群落

的 CO₂ 收支动态^[11]。在允许的植物冠层高度范围内, 用此法测定 CO₂ 的吸收和排放动态, 不受生态系统类型的限制, 特别适用于大范围、中长期的定位观测, 能推算出数公顷的植被的代表值。但此法要求下垫面气流保持一定的稳定性, 受地表附近的地形和植被构造的影响显著。而且该方法还要受到成本和技术的限制, 在实际应用中具有一定的局限性。

1.2 气室法

气室法是在土壤表面安装用金属或树脂制作的气室, 根据气室内从土壤表面向大气扩散 CO₂ 的速率进而算出土壤呼吸速率的方法。这种测定方法的优点是能观测到小范围的土壤呼吸特性及其细微的变化。但在受到空间不均一性的影响下, 进行大尺度扩展同样有一定的困难。此外, 从气室安置于地表时起, 气室内的环境就和自然状态产生一定差异, 由此会产生一些误差。

气室法按其测定原理也可分为两大类型, 一类是封闭型气室法, 另一类是开放型气室法^[12]。两者的区别是气室内的空气与外界是否连通。封闭型气室法在测定时气室内的空气暂时与外界隔绝, 通过测定气室内 CO₂ 浓度随时间的变化而获得土壤呼吸释放 CO₂ 的速率。而开放型气室法是向气室内注入一定流量的气体, 通过计算入口处与出口处 CO₂ 浓度而获得土壤呼吸速率的一种方法。其中, 封闭型气室法又可进一步分为静态气室法(静态碱液吸收法、静态密闭气室法)和动态气室法(动态密闭气室法、自动开闭气室法)。静态气室法就是测定一个时间段前后气室内的 CO₂ 浓度, 由此得到单位时间内土壤释放的 CO₂ 量。动态气室法是使用红外线 CO₂ 分析仪(IR-GA)和气室连成一个闭合型流路, 使一定量的空气在流路内循环, 由此计算出其空气中的 CO₂ 浓度的时间变化。两者的区别在于是否使气室内的空气强制流动。开放型气室法都属于动态式的, 以通气法最具代表性。

2 各种气室法的特点及实际应用

2.1 静态碱液吸收法

该方法是静态气室法中常用的、也是应用最早的一种化学方法。具体做法是把盛有碱溶液(NaOH 或 KOH)或固体碱粒的容器敞口置于气室内, 放置一段时间后, 因部分碱液吸收 CO₂ 形成碳酸盐, 用中和滴定法或重量法计算出剩余的碱量, 便可根据相应公式计算出一定时间内土壤释放的 CO₂ 量^[13]。这种方法操作非常简单, 不需要复杂的仪器设备, 也可以多点测定, 便于在较大的时空尺度上展开研究。迄今

为止,碱液吸收法在草原^[14-16]、农田生态系统^[17]、森林^[18-19]和沙地^[20]的土壤研究中得到了广泛应用。但碱液吸收法测定精度不甚理想,普遍认为当土壤呼吸率低时,测定结果高于真实值^[21-23];若土壤呼吸率处于很高水平,则测定结果会低于真实值^[24]。因此对于碱液吸收法测定的土壤呼吸数据需进行校正^[24]。

2.2 静态密闭气室法

用真空采样瓶等每隔一定时间采取气室内的空气样品,用红外线 CO₂ 分析仪^[25]或气相色谱仪^[26]来分析其中的 CO₂ 浓度,根据 CO₂ 浓度的时间变化算出土壤的呼吸速率。该方法在野外期间只采样气,操作简便,不需要药品和动力,运用也很普遍。

2.3 动态密闭气室法

将气室和红外线 CO₂ 分析仪连成闭合型流路,使一定流量的空气在流路内循环,同时检测其中 CO₂ 浓度随时间的变化。随着 IRGA 分析技术及相关仪器的不断改进,此法已成为目前最为流行的测定方法,以美国 LI-COR 的相关仪器最为著名。

2.4 通气法

通气法是开放型气室法的代表方法,它的测定原理是从气室的一方往气室内注入一定流量的空气,再

从另一方将相同流量的空气吸出。根据注入的空气和所吸出的空气中 CO₂ 浓度差来计算土壤的呼吸速率^[12-13,27]。它的测定原理与光合作用同化相同,在光合作用测定中得到了充分验证和广泛的应用。随着光合作用研究技术的迅速发展,新的仪器设备大大提高了通气法的测量精度。目前在农田^[27]、果园^[28-30]和林地^[31-32]等许多生态系统的土壤呼吸测定中得以应用。通气法在测定一个群体的 CO₂ 流量(流入或流出)方面有很多应用。例如:在位于北极冻土地带的植被设置透明材料制作的气室,应用此法可直接测定群落的净生产量^[33]。还有人将透明的气室固定在水田表面,测定水面总体的 CO₂ 流量(包括土壤呼吸、浮草类和绿藻类的光合作用与呼吸量等)^[34]。此外,还有人用该方法测定雪地表面的 CO₂ 流量^[35-36]。

3 气室法的性能比较和存在的主要问题

气室法虽然是目前测量土壤呼吸的主要方法,但在实际操作中每种气室法都各有利弊。Nakadai et al 和 Bekku et al 就它的有效性和问题点^[13-23]进行了分析和探讨。本文也将各种方法的主要性能作了简要的比较(表 1)。

表 1 各种气室法的性能比较

种类	连续测定	多点测定	电源要求	携带便利性	成本	其它主要问题
静态碱液吸收法	不可	可以	无	好	低	测量精度低
静态密闭气室法	不可	可以	无	好	高	易产生气样采集的人为误差
动态密闭气室法	基本可以	基本可以	交、直流	可以	高	气室内 CO ₂ 浓度略有升高
自动开闭气室法	可以	可以	交、直流	可以	高	需注意影响开闭的物理故障
通气法	可以	可以	交、直流	可以	高	气室内外气压差具有一定影响
开顶箱法	可以	可以	交、直流	可以	高	自然风的影响

碱液吸收法和静态密闭气室法在野外操作简便,曾经被广泛应用。如有可能同时多设置几个气室,运用这种手法可以研究土壤呼吸的空间变异。但这两种方法具有明显的人工采样、人工测定的特点,精确度会受到质疑,而且也不适合连续测定。低成本是碱液吸收法的最大特点;静态密闭气室法尽管在采样阶段成本较低,但进行 CO₂ 浓度分析的仪器(如气相色谱仪)还是高额的。

目前广泛使用的动态气室法由于仪器性能比过去大大提高,自动化程度高,受到了很好的评价。而且,LI-COR 公司还开发了可以进行多点测量的多路系统,通过自动转换能够对多达 16 个气室进行轮流测定,实现了同一样点重复测定的时间间隔在 2 h 之内。事实上,动态气室法已经实现了从动态密闭气室法向自动开闭气室法的转变。尽管如此,测定点数问题仍然是该方法的一个限制因素,此外还有高额的仪器价格这一问题。

通气法由于往气室内注入一定流量的气体,不会改变气室内的环境,因此在一定期间内可以进行连续测定。但这种方法也存在着气室内外气压差的问题^[37]。在测定期间,气室内的气压常常高于外界,导致土壤中 CO₂ 的释放受到一定的抑制,使测定值略低于实际值。受流量控制的影响,有时也会出现气室内的气压低于外界气压的情况,导致在通常大气压下释放不出的 CO₂ 得以释放,使得测定结果偏高。这个问题受气室和气泵之间距离的影响,在仪器设置时应予以注意。

4 测定方法的改善

在运用气室法测定土壤呼吸时,人们普遍关注以下 3 方面的问题:(1)能否进行多点同时测定;(2)能否进行长期、连续的测定;(3)测量的精度是否满足要求。如果能同时满足以上 3 个条件,便是一种非常理想的土壤呼吸测定方法。技术人员正是围绕上述

目标不断进行仪器的研发和改进。自动开闭气室法和开顶箱法就是近年来不断完善的方法。这两种方法使 CO_2 浓度分析器的精确度得到了提高, 同时也使设备小型化、轻量化。

开顶箱法就是在通气法的基础上改良了气室的形状^[38]。随着气室形状的改变, 通气路线也发生变化, 避免了气室内外气压差的问题。这种方法能够将气室周围的空气直接吸入气室内, 使 CO_2 浓度基本稳定, 而且可以增加测定的气室数量。

自动开闭气室法克服了动态密闭气室法早期的各种不足之处, 能够长期连续测定和多点测定, 进气口和压力通风口设计独特, 大大提高了测量的精确度。自动开闭气室法在开发初期是不能搬运的, 而且常常出现气室开闭的机械故障, 但目前已经大大改善。LI-COR 公司开发的分别适合于单点测定和多点测定的 LI-8100 和 LI-8150 测量系统虽然价格比较昂贵, 但在测量准确性、稳定性和使用便利性等方面都达到了很高的水准。可以预料, 这种方法将在今后的土壤呼吸测定中占主导地位。

5 土壤呼吸测定方法及研究热点展望

对于上述多种测定方法的运用, 可根据研究目的有所侧重。测定自然环境条件下的总呼吸速率, LI-COR 公司的单点和多点测量系统受到广泛欢迎。但是通过采集土壤样品测量其特定条件下的呼吸速率, 碱液吸收法仍然具有普遍适用性。由于碱液对 CO_2 的吸收量也可通过测定溶液电导率进行计算, 从而使该方法得以进一步发展^[39-40], 实现对同一样品随时间推移的多次测定, 这是中和滴定法所达不到的。该方法在研究诱导呼吸等项目时十分便利。

测定土壤呼吸不仅是研究陆地生态系统碳循环的重要内容, 而且对研究全球范围的碳排放有着重大意义。为了准确把握生态系统的固碳效应, 除了探明植被通过光合作用从大气中吸收 CO_2 的动态以外, 还要探明系统内通过土壤呼吸向大气释放 CO_2 的动态特征。

探明土壤呼吸各组分的动态特征也是一项重要的研究课题。据初步研究显示, 土壤呼吸中根呼吸的贡献率在 10% ~ 90%, 偏差很大^[41-43]。这一方面表明各组分的贡献率是动态变化的, 另一方面也说明由于测定方法的不同也会产生较大的误差。推算土壤根呼吸常用的方法是开沟隔离法^[32]。就是将样方与四周的根切断, 用隔离板将样方与周围的植物及土壤环境隔开, 放置一段时间后再测定样方内外的土壤呼吸, 根据差值来推算根系呼吸的贡献率。

研究环境因子对土壤根呼吸和微生物呼吸影响也将是一个重要课题, 而且应对不同的生态系统进行比较研究。土壤含水量和土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因子^[44]。在干燥气候环境下和土壤水分含量较低的土壤, 水分因子的影响尤为显著, 一次降水过程后土壤呼吸会有大幅度的升高, 而且暂时增大的这部分土壤呼吸量相当于年间土壤呼吸量的 16% ~ 21%, 是不容忽视的^[31-32]。温度影响所有的生物代谢过程, 土壤呼吸也不例外。温度与土壤呼吸总体上呈现一种正相关关系, 但在温度因子为非主导环境因子的情况下可能不明显。在较大的时间和空间尺度上, 温度的影响会明显地体现出来。因此, 在全球气候变化越来越受到广泛关注的今后一个时期, 研究各典型生态系统中土壤呼吸对温度的响应特征也将受到关注。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change Impact adaption and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.
- [3] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon storage potential of soils[J]. Nature, 1990, 348: 232-234.
- [4] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 23-36.
- [5] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 等. 森林生态系统土壤呼吸研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 589-594.
- [6] Schulze E D, Valentini R, Sanz M J. The long way from Kyoto to Marrakesh: Implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology[J]. Global Change Biology, 2002, 8(6): 505-518.
- [7] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An analysis of global change[M]. 2nd edition. San Diego: Academic Press, 1997.
- [8] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.
- [9] Lloyd J, Taylor J A. ON the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [10] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends[J]. Ecology, 1989, 70(5): 1346-1354.
- [11] 肖复明, 张群, 范少辉. 中国森林生态系统碳平衡研究[J]. 世界林业研究, 2006, 19(1): 53-57.
- [12] Nakayama F S. Soil respiration[J]. Remote Sensing Reviews, 1990, 5(1): 311-321.

- [13] Bekku Y, Koizumi H, Oikawa T, et al. Examination of four methods for measuring soil respiration[J]. *Applied Soil Ecology*, 1997, 5(3): 247-254.
- [14] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 831-836.
- [15] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO₂ 排放速率研究[J]. *植物学报*, 1999, 41(6): 645-650.
- [16] 崔晓勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO₂ 排放规律的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 390-394.
- [17] 诸葛玉平, 张旭东, 刘启. 长期施肥对黑土呼吸过程的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 392-394.
- [18] Yim M H, Joo S J, Shutou K, et al. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175(1/3): 585-588.
- [19] Winkler J P, Robert S C, William H S. The Q₁₀ relationship of microbial respiration in a temperate forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(8): 1067-1072.
- [20] 李玉强, 赵哈林, 李玉霖, 等. 沙地土壤呼吸观测与测定方法比较[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(5): 680-686.
- [21] Nay S M, Mattson K G, Bormann B T. Biases of chamber methods for measuring soil CO₂ efflux demonstrated with a laboratory apparatus[J]. *Ecology*, 1994, 75(8): 2460-2463.
- [22] Grogan P. CO₂ flux measurement using soda lime: Correction for water formed during CO₂ adsorption[J]. *Ecology*, 1998, 79(4): 1467-1468.
- [23] Nakadai T, Koizumi H, Usami Y, et al. Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land effect of carbon dioxide concentration on soil respiration[J]. *Ecological Research*, 1993, 8(1): 65-71.
- [24] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式[J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1748-1761.
- [25] Bekku Y, Koizumi H, Nakadai T, et al. Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique[J]. *Ecological Research*, 1995, 10(3): 369-373.
- [26] Koizumi H, Kontturi M, Mariko S, et al. Soil respiration in three soil types in agricultural ecosystems in Finland[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 1999, 49(2): 65-74.
- [27] Nakadai T, Koizumi H, Bekku Y, et al. Carbon dioxide evolution of an upland rice and barley, double cropping field in central Japan[J]. *Ecological Research*, 1996, 11(2): 217-227.
- [28] Sekikawa S, Kibe T, Koizumi H, et al. Soil carbon sequestration in grape orchard ecosystem in Japan[J]. *Journal of the Japanese Agricultural Systems Society*, 2003, 19(2): 141-150.
- [29] Sekikawa S, Kibe T, Koizumi H, et al. Soil carbon budget in peach orchard ecosystem in Japan[J]. *Environmental Science*, 2003, 16(2): 97-104.
- [30] Sekikawa S, Koizumi H, Kibe T, et al. Diurnal and seasonal changes in soil respiration in a Japanese grape vine orchard and their dependence on temperature and rainfall[J]. *Journal of the Japanese Agricultural Systems Society*, 2002, 18(1): 44-54.
- [31] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002, 17(3): 401-409.
- [32] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, et al. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool temperate deciduous forest[J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 311-318.
- [33] Muraoka H, Uchida M, Mishio M, et al. Leaf photosynthetic characteristics and net primary production of the polar willow (*Salix polaris*) in a high arctic polar semi desert, Ny Alesund, Svalbard[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2002, 80(11): 1193-1202.
- [34] Koizumi H, Kibe T, Mariko S, et al. Effect of free air CO₂ enrichment (FACE) on CO₂ exchange at the flood water surface in a rice paddy field[J]. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 231-239.
- [35] Mariko S, Nishimura N, Mo W H, et al. Winter CO₂ flux from soil and snow surfaces in a cool temperate deciduous forest, Japan[J]. *Ecological Research*, 2000, 15: 363-372.
- [36] Mariko S, Nishimura N, Mo W, et al. Measurement of CO₂ fluxes from soil and snow surfaces with open dynamic chamber technique[J]. *Environ. Sci.*, 2000, 13(1): 69-74.
- [37] Fang C, Moncrieff J B. An improved dynamic chamber technique for measuring CO₂ efflux from the surface of soil[J]. *Functional Ecology*, 1996, 10(2): 297-305.
- [38] Fang C, Moncrieff J B. An open top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure difference on CO₂ efflux measurement[J]. *Functional Ecology*, 1998, 12(2): 319-325.
- [39] Wolf J M, Brown A H, Goddard D R. An improved electrical conductivity method for accurately following changes in respiratory quotient of single biological sample[J]. *Plant Physiology*, 1952, 27: 70-80.

影响最大, 而单位土地二、三产业增加值, 单位土地国内生产总值和城市住宅用地对土地利用产出的影响占到了 91.01%。这表明武汉市的土地利用投入主要体现在对社会固定资产的投资上, 而土地产出则主要体现在土地利用带来的经济效益和空间承载力上。

土地利用投入与产出, 直接关系到城市土地的可持续发展。因此, 对城市土地集约利用过程中的土地投入与产出的研究具有指导性的意义。在今后的研究中对城市土地利用投入的指标选取应该更加全面和有代表性, 在土地利用产出中除了考虑经济效益的产出外还应该涉及社会效益和环境效益的产出。当然在对土地利用投入与产出的分析过程中除了运用传统是数学方法外还可以把 RS 和 GIS 的相关技术运用到分析中。

参考文献:

- [1] 王万茂. 土地利用规划学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 13.
- [2] 毛蒋兴, 闫小培, 王爱民, 等. 20 世纪 90 年代以来我国城市土地集约利用研究述评[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(2): 48-57.
- [3] 王静, 邵晓梅. 土地节约集约利用技术方法研究: 现状、问题与趋势[J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 68-74.
- [4] 陶志红. 城市土地集约利用几个基本问题的探讨[J]. 中国土地科学, 2000, 14(5): 1-5.
- [5] 白冰冰, 成舜, 李兰维. 城市土地集约利用潜力宏观评价探讨: 以内蒙古包头市为例[J]. 华东师范大学学报: 哲学社会科学版, 2003, 35(1): 83-124.
- [6] 翟文侠, 黄贤金, 张强, 等. 基于层次分析的城市开发区土地集约利用研究: 以江苏省为例[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(1): 96-102.
- [7] 郭爱请, 葛京凤. 河北省城市土地集约利用潜力评价方法探讨[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 65-70.
- [8] Zhang Huayu, Shen Lei. Evaluation of Urban Land Intensive Use Take the Case of a Changing City of Shenzhen as an Example[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(6): 1009-1021.
- [9] 卞兴云, 冉瑞平, 贾燕兵, 等. 山东省城市土地集约利用时空差异[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 617-621.
- [10] 史丽君, 张绍良, 王浩宇, 等. 基于 PSR 框架的徐州市城市土地集约利用评价研究[J]. 国土与自然资源研究, 2006(1): 4-5.
- [11] 杨东朗, 张晓明, 刘萍. 基于 PSR 模型的城市土地集约利用评价[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 90-93.
- [12] 洪增林, 薛惠峰. 城市土地集约利用潜力评价指标体系[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 701-011.
- [13] 郭显光. 熵值法及其在综合评价中的应用[J]. 财贸研究, 1994, 20(6): 56-60.
- [14] 宋红梅, 侯湖平, 张绍良, 等. 基于熵值法的城市土地集约利用评价: 以徐州市为例[J]. 资源开发与市场, 2007, 23(2): 116-118.
- [15] 武汉市统计局. 2004-2008 年武汉市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [16] 重庆市统计局. 2004-2008 年重庆市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [17] 南京市统计局. 2004-2008 年成都市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [18] 上海市统计局. 2004-2008 年上海市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [19] 杨林泽. 长三角区域地均产出率评价问题研究[EB/OL]. <http://www.raresd.com/20071206200640.htm>. [2010-05-12].
- [20] 聂艳, 于婧, 胡静, 等. 基于系统协调度的武汉城市土地集约利用评价[J]. 资源科学, 2009, 31(11): 1934-1939.

(上接第 152 页)

- [40] Rodella A A, Saboya L V. Calibration for conductimetric determination of carbon dioxide[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 2059-2060.
- [41] Thierron V, Laudelout H. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1996, 26(7): 1142-1148.
- [42] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 115-146.
- [43] Epron D, Farque L, Lucot E, et al. Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration[J]. Annals of Forest Science, 1999, 56(4): 289-295.
- [44] Epron D, Farque L, Lucot E, et al. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content[J]. Annals of Forest Science, 1999, 56(3): 221-226.