

植被恢复下土壤结构与功能的关系

尚应妮¹, 赵世伟^{1,2}, 王子龙², 黄菁华², 霍娜¹, 常闻谦¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过查阅有关土壤结构和土壤功能的国内外文献,对土壤结构和土壤功能的研究进展、土壤结构稳定性指标以及土壤结构的研究方法进行了阐述;讨论了土壤结构与土壤的作物生产功能、土壤水库功能、土壤碳库功能、土壤基因库功能等的关系;并对激光共聚焦扫描技术在土壤结构与孔隙特征分析中的应用及数字图像处理技术的应用如何反映土壤孔隙的真实状况,加强对土壤结构及其功能的定量关系研究等方面提出了展望。

关键词:土壤结构; 孔隙特征; 土壤功能; 土壤水库; 土壤碳库

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0370-06

Relationship of Soil Structures and Functions Under Vegetation Restoration

SHANG Yingni¹, ZHAO Shiwei^{1,2}, WANG Zilong², HUANG Jinghua², HUO Na¹, CHANG Wenqian¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:Through consulting literature about soil structures and functions, we reviewed the research progress in soil structures and functions, soil structure stability indicators and research methods of soil structure, discussed the relationships between soil structure and the soil functions of crop production, soil reservoir, soil carbon pool and soil gene pool, and presented the prospects of developing confocal laser scanning technology in the analysis of the soil structure and pore characteristics, applying digital image processing techniques to reflect the real situation of the soil porosity and strengthening the research about the quantitative relationship between soil structure and function in the future.

Keywords:soil structure; pore characteristics; soil function; soil reservoir; soil carbon pool

土壤结构是土壤功能发挥的基础,不同学者从不同的角度对土壤结构进行了解释。从宏观角度来说,Amézqueta^[1]认为土壤中的黏粒、粉粒、砂粒与有机质相互作用,胶结为不同粒径大小的团聚体,并在三维空间进一步组织排列为一定的结构形式,即为土壤结构。从形成角度来说,Dexter^[2]认为土壤结构是由矿物颗粒和有机物等在干湿冻融交替等自然物理过程作用下形成的不同尺度大小的多孔单元。从土壤结构功能角度出发,彭新华^[3]、赵其国^[4]等指出土壤结构是维持土壤功能的基础,直接影响着土壤的通气、透水性能。土壤退化其核心是土壤结构体的退化。土壤结构的好坏主要取决于土壤孔隙结构、土壤团聚体以及土壤胶结物质的作用方式和强度。植被恢复

与重建产生的土壤环境效应将直接影响土壤结构,而不同的土壤结构决定了土壤功能的强弱。各种土壤的不同功能有其空间分异、历史演替和强弱序列的特征^[5]。结合国内外土壤功能分类,可以看出,土壤功能主要包括:作物生长、缓冲过滤、栖息地和基因库、自然景观和文化遗产、原材料生产、建设承载等几个方面。土壤功能的变化也在深刻影响着各个国家的社会经济、生态环境持续发展。1982 年联合国粮食及农业组织、联合国环境规划署和国际土壤学会拟定了《世界土壤宪章》,强调了土壤资源与粮食安全、土壤圈与全球变化的相关性。其中指出,土地资源是有限的,土地生产粮食的能力也是有限的,呼吁各国政府和民众参与土壤保护活动,并根据土壤功能考虑合

理的土地利用方式和社会经济要素^[6]。良好的土壤结构的培育是提高土壤功能的根本途径。因此,为了资源的合理利用与社会的可持续发展,加强土壤结构与功能领域的研究十分必要。通过研究植被恢复下土壤结构与功能的关系,有助于土地规划者了解土壤不同功能的运用,为土壤资源保护和土地利用合理规划提供科学参考依据。

1 土壤结构与功能的概念

土壤结构是由土壤颗粒通过不同的堆积方式相互粘结而形成的。土壤结构一词实际上包含两方面的含义,一是指各种不同的结构体的形态特性,即土壤结构体;二是泛指具有调节土壤物理性质的“结构性”,即土壤结构性。土壤结构体是各级土粒由于不同原因相互团聚成大小、形状和性质不同的土团、土块、土片等土壤实体。土壤中单粒和复粒(包括团聚体)的数量、大小、形状、性质及其相互排列、组合形式以及相应的孔隙状况^[7],土壤结构体实际上是土壤颗粒按照不同的排列方式堆积、复合而形成的土壤团聚体。不同的排列方式往往形成不同的结构体。这些不同形态的结构体在土壤中的存在状况影响土壤的孔隙状况,进而影响土壤的肥力和耕性,也会影响土壤不同功能的发挥。土壤结构性表征土壤是一种重要的物理性质的状态,土壤结构的好坏主要是指土壤结构性的好坏。

土壤功能是由土壤自身的物质循环、能量流动、生物演替和信息传递特征决定的,是土壤的固有属性^[8]。同时,土壤也是一个多重功能的载体,角度不同,对其理解也有所差异。

1992 年在美国召开的土壤质量会议^[9],认为土壤的主要功能包括三个方面:一是生产力;二是环境质量;三是动物健康。即土壤在生态系统的范围内,具有维持生物的生产力、保护环境质量以及促进动植物健康的能力。2002 年欧洲委员会^[10]将土壤功能分为粮食和其他生物的生产功能、存储过滤和转换功能、栖息地和基因库功能、自然和文化景观功能以及原材料来源功能。而在英国的第一部土壤行动计划^[11]中,则将土壤主要功能分为六个,即生产功能、土壤对水和空气的环境交互功能、生物多样性保留功能、发展平台功能、提供原料功能和文化遗产保护功能。土壤也同样有直接的经济价值,例如土壤能够吸附尘埃,产出新鲜的空气,也能产出经济作物,并净化饮用水。此外,土壤作为基因库被广泛认可,土壤中

某些微生物还具有生物制药的潜力。土壤作为一种有生命的动态资源,同时也有维持全球生态平衡的功能。在《欧盟土壤保护修复指导框架》^[12]中,碳存储作为土壤功能之一,首次被列入指导框架。从相关的表述中可以发现人们对土壤功能的认识在不断深化。

相比而言,国内关于土壤功能的分类及其相关研究相对较少。赵其国等^[9]在探讨土壤质量时指出,土壤质量与土壤的基本功能有关,土壤质量评价应对土壤的 5 个特定的功能因子进行评价。姜明^[13]、崔巍等^[14]针对湿地土壤,进行了土壤环境功能划分与归纳。此外,为探讨城市化过程中人为活动对环境的影响,何跃等^[15]在研究中在国内首次关注了土壤的记录功能。蒋端生等^[5]认为土壤质量及其评价建立在土壤功能之上,各种土壤的不同功能有其空间分异、历史演替和强弱序列。梁思源等^[16]归纳总结了土壤的不同功能,认为土壤不但具有作物生产功能,还是环境交互媒介、动植物栖息地,同时为人类提供居住环境 and 原材料。

2 土壤结构的评价指标与研究方法

土壤结构的好坏不仅与土壤结构的大小、形状和肥力特征有关,也与土壤结构的稳定性有密切的关系。土壤结构的稳定性通常包括土壤团聚体的水稳定性和土壤机械稳定性。土壤团聚体数量和质量评价是土壤结构评价的重要组成部分,常用 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量作为评价指标。同时,为了准确地评价土壤团聚体质量,不仅要重视各级别团聚体的数量,还应当重视团聚体的直径^[17]。Van Bavel^[18]采用加权求和方法提出了结构体平均质量直径(mean weight diameter, MWD)的概念;Gardener^[19]在此基础上提出了几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)的概念。MWD 和 GMD 作为土壤团聚体状况综合评价指标已被广泛应用。近年来,也有人借鉴分形理论,将其应用到土壤颗粒和团聚体的组成等研究方面,提出用分形维数(fractal dimension)作为指标表征土壤团聚体的分布状况^[20-22]。此外,祁迎春等^[17]尝试将矩法应用于土壤团聚体质量评价方面,结果表明理论和其中的偏倚系数 Cs 能够较为灵敏地地表征各类土壤的团聚水平。

由于土壤结构揭示了土壤各个组分和特性的空间异质性。更复杂的是土壤结构固有的不稳定性,因而产生了它们在时间上的易变性和在空间上的不均匀性。再加上土壤结构强烈地受气候、生物活动以及

土壤管理的影响,并且也易遭到机械的和物理化学性质的破坏力的作用。基于这些原因,还没有真正客观的、通用的方法来测定土壤结构本身,所以土壤结构一词还是一个定性的概念,而非数量化了的性质。学者们尽管已经提出很多测定土壤结构的方法,但事实上都是间接的方法,只是测定认为和结构相依存的这个或那个土壤属性,并非结构本身。

干筛法是将一系列套筛放于振荡架上,放入一定量的土壤样品,振动后测定留在各级筛子上团聚体的重量百分含量。干筛法一般不单独使用,常常与湿筛法结合起来应用。湿筛法是约得 1936 年提出来的,是衡量土壤中团聚体的水稳性方法。湿筛法是目前土壤团聚体研究中应用最广泛的方法。

土壤微形态法是应用偏光电镜或扫描电镜等显微镜法(α)来代替肉眼研究土壤团聚体的方法。与常规土壤物理分析方法相比,CT 可以在不扰动分析对象内部结构的情况下直接对原状土壤样本进行分析,且成像及分析速度快,可以进行三维立体分析等。近年来,应用 X 射线 CT 扫描技术分析土壤的孔隙度、孔隙分形维数^[23-24]和孔隙空间分布状况等已经成为土壤孔隙特征研究的新方法^[25-28]。Rachman 等^[29]发现利用 CT 扫描方法和利用传统的土壤持水量推算法所测定的土壤大孔隙度数据结果十分接近。赵世伟等^[30]利用 CT 扫描和图像处理技术对植被自然恢复演替过程中的土壤孔隙特征进行了研究,结果表明土壤孔隙数、孔隙度、孔隙成圆率和分形维数等孔隙参数均得到极显著的提高。

现在,随着超声技术的发展,已有研究人员提出了一套新的土壤团聚体稳定性评估系统^[31-32]:利用功率超声粉碎土水中土壤团聚体,通过实时监测土水溶液温度和超声系统输入功率的变化,计算出土壤超声分散能量,进而确定土壤团聚体的稳定性。土壤分散能量可以勾画出土壤物理分散过程,即随时间变化,土壤超声分散功率递减,分散能量递增,充分体现了超声激励下土壤团聚体从初始团聚状态到完全分散状态的逐渐分解过程。这种方法与以往的土壤团聚体研究相比,能定量地分析团聚体稳定性。

3 土壤结构与功能的关系

以下仅从土壤的作物生产功能、土壤水库功能、土壤碳库功能、土壤基因库功能等几方面对土壤结构和功能的关系加以阐述。

3.1 土壤结构对土地生产力的影响

Blum 和 Santelises^[33]认为土壤是植物生长的介

质,是农业生产的基地。即土壤的生产力(提高植物和生物生产力的能力)功能^[9]。在农田生态系统中,水、肥、气、热等因素决定着土壤肥力,而水、肥、气、热的合理调控又与土壤结构有着直接关系。土壤团粒结构既在保持土壤肥力、增加通气性、透水性、抗蚀性方面发挥重要作用,又与单粒一起成为构成土壤结构的骨架颗粒,共同维持着土壤结构的稳定性。有良好团粒结构的土壤在作物生长期间能很好地调节植物对水分、养分、空气和温度的需要,从而促进作物获得高产^[34]。近年来,国内外有关于土壤团粒结构的研究结果表明^[35-37]:土壤有机质在土壤结构的形成过程中起关键作用,土壤团粒结构能够影响土壤水热状况;土壤团聚体结构的稳定性对土壤肥力、质量和土壤的可持续利用具有重要影响。在保持土壤良好结构的同时,也要科学合理地利用土地,因土种植,如基本农田的园林化建设和坡耕地的梯田建设等,从而最大限度地提高土地生产力,充分发挥土壤的基本功能。

土壤团聚体是衡量土壤肥力的指标之一,土壤有机碳的数量和质量在很大程度上也与维持和提高土壤肥力密切相关。良好的土壤结构有助于土壤肥力的提高,进而帮助作物获得高产。但是目前关于土壤结构与土地生产力的直接关系尚不清楚,缺乏对土壤结构与作物产量的定量关系的讨论。如何通过调控土壤结构使得土壤肥力得以充分发挥,从而提高土地生产力,定量指示土壤结构与生产力功能的关系,将成为今后研究的重点。

3.2 土壤结构与土壤水库功能的关系

土壤是布满孔隙的疏松多孔体,具有明显的存蓄、调节水分的功能,满足植被生长的需要,称之为土壤水库。土壤水库受植被、土壤、地形和气候等因子的影响,各因子通过作用于土壤水库库容、瓶颈和蒸发性能,对土壤水库的功能进行调控。植被因子是影响土壤水库功能最活跃、最积极的因素^[38],同时通过植被—土壤复合体改善土壤结构,提高涵蓄降水,控制水土流失。

合理的植被措施可以改善土壤结构和水力特性^[39]。土壤结构决定了土壤水分动态变化,通过对土壤孔隙状况的影响,进一步影响土壤的入渗能力。土壤的入渗性能就直接决定了土壤水库的调蓄能力和功能发挥。因此,维持高入渗性能,才能发挥土壤水库的功能。根据蒋定生等^[40]的研究,目前黄土地区不同植被覆盖下土壤稳定入渗率常高达 0.5~12 mm/min,其中以坡耕地最低,有时可下降到 0.2

mm/min 以下,一经丢荒,3~5 a 后便会随着植被的恢复而不断提高。勃海锋等^[41]的研究说明随着退耕地上植被的恢复,土壤中有效孔隙数量不断增加,土壤饱和导水率和入渗性能得到提高。植被自然演替过程中,土壤的物理性质得到改善,土壤的田间持水量逐步提高^[42]。刘娜娜等^[43-44]等通过对草地和柠条土壤持水性的研究得出,植被恢复通过提高土壤有机质含量,改善土壤结构,显著提高土壤水库的蓄水能力和持水能力。杨永辉等^[45]对不同植被下土壤入渗性能的研究也表明土壤中有机碳含量的增加是提高土壤结构稳定性的重要因子,改善了降雨入渗过程及入渗率,恢复了土壤水库功能。

植被恢复与重建条件下,土壤的入渗性能、持水和供水性能均得到明显提高,而土壤有机碳含量的增加、土壤团聚体稳定性的提高,改善了土壤的物理学特性,从而驱动了上述土壤水库特征和功能的改善。良好土壤水库功能的发挥对于防治水土流失有重要作用,促进了水土保持功能的发挥。土壤结构的稳定性和孔隙状况决定了水库功能的发挥,但是目前土壤结构与土壤水库功能的定量关系并不清楚,需进一步探索。

3.3 土壤结构与土壤碳库功能

土壤是陆地生态系统一个容量很大的碳库,如果可以将大气中的 CO₂ 固定在土壤中,既可以缓解温室效应给人类带来的灾难,又可以改良土壤结构,提高土壤肥力。全球土壤中储存的有机碳高达 1 500 Pg^[46],是大气 CO₂ 总量的 3 倍、陆地生物碳量的 2.5 倍。土壤通过呼吸产生的 CO₂ 排放量是决定陆地生态系统碳平衡的主要因子^[47]。

土壤固碳是当今土壤学的新兴研究领域,许多学者对土壤固碳都比较重视并开展了相应的工作,而认识土壤固碳的过程和机理是这种研究的基础依据。植被类型可直接影响土壤有机碳含量,因为植被的根系分泌物和残落物是土壤有机碳的主要来源。另外,气候对土壤有机碳的影响主要是通过影响植被而起作用的^[48]。有机质是团聚体形成的重要胶结物质,土壤有机质含量的提高可以促进土壤团聚体的形成,改良土壤结构;土壤团聚体的形成又可以保护土壤有机碳免受微生物分解。这种物理保护机制使得土壤有机碳通过形成土壤团聚体或被包裹在团聚体内部,形成团聚体结合态有机碳,从而减少矿化分解、提高稳定性。由于土壤固碳的物理机制与土壤管理密切相关,所以团聚体形成作用被认为是土壤碳固定的最重要机制^[49]。我国耕地土壤碳密度仅为欧洲土壤的

2/3,为自然植被下土壤碳密度的 3/4^[50],具有更大的固碳潜力与碳库容量。许多研究已显示退化农田或其他土地利用转变为林地,将会提高土壤有机碳的含量。Johnston 等^[51]报道,在退化农田上造林 40 a,土壤有机碳平均每年提高 0.8 mg。Conant 等^[52]报道从农田转变为草地后,土壤有机碳固定速率为 0.11~3.04 mg/h²。Guo 等^[53]研究表明,从草地变为人工林,土壤碳储量下降 10%,而从农田转变为人工林,土壤碳储量增加 18%。植被恢复措施能显著提高土壤的总有机碳含量和有机碳密度,能显著提高土壤团聚体稳定性有机碳组分含量,研究表明植被的天然恢复更有利于提高稳定性有机碳库容^[54]。我国学者也对不同土地利用方式下的土壤固碳潜力进行了研究。吴庆标等^[55]对森林生态系统植被固碳潜力进行了估算,郭然^[56]、段晓男^[57]、韩冰^[58]等分别对草地、湿地、农田土壤生态系统的固碳潜力进行了估算。

目前土壤固碳的机理已经清楚,但对于土壤固碳的强度、土壤碳库容量的研究还不清晰。另外,土壤固碳潜力与土壤结构有何量化关系有待研究,如何通过合理的土地利用和管理方式使我国退化严重的农田土壤发挥巨大的固碳潜力也有待进一步研究。

3.4 土壤结构与土壤的基因库功能

土壤的基因库功能主要表现在土壤生物多样性方面。土壤生物由土壤微生物、土壤动物和土壤低等植物三部分组成,植被恢复使得土壤生物多样性更加丰富。土壤是一个丰富的种子库和基因库,土壤中保存了不同年代、不同植物的种子以及许多动物的卵、蛹、幼虫及越冬态等不活动状态,它们在土壤中能保存较长的时间,而且一般多具有生物活性。土壤种子库的存在使许多物种基因得以保存和延续,这对保护生物多样性和恢复地球上已经灭绝的植物物种具有十分重要的意义。

土壤中微生物、动物的活动有助于土壤孔隙的形成,蚯蚓等的活动也促进了土壤团粒结构的形成,土壤中的动植物残体及它们的分泌物和代谢物也为土壤提供了有机物质,帮助形成更好的土壤结构。目前土壤的基因库功能缺乏深入的研究,已有的研究多集中在土壤种子库方面,相对单一,土壤的生物基因在土壤结构体中的分布和保护状态的研究鲜有报道。

4 存在问题与研究展望

(1) 对土壤结构本身的研究相对较少,对土壤结构与土壤功能的关系更是鲜有提及,对土壤功能的认

识还不够全面。

(2) 植被恢复对土壤结构及其物理性质影响方面的研究还比较单一,缺乏系统的、全面的、有建设性的全方位研究,难以为土壤的可持续经营提供科学依据。

(3) 对于土壤水库的研究大多停留在对土壤的蓄水量方面的描述,而土壤水库在不同影响因子或多个影响因子共同作用下,潜在库容和实际库容、总库容和分库容的变化研究较少。而土壤水库效应及机理的研究现在还处在描述性阶段。

(4) 目前仍通用的一些水文模型多为经验模型,将土壤作为一个黑箱或灰色系统来对待,没有将土壤本身的基本性质(如有机碳含量、结构稳定性、孔隙度、容重、持水性能等)和土壤水分过程(如土壤入渗过程、植物根系吸水过程、土面蒸发过程等)引入模型中,不能很好地模拟土壤水库形成过程、功能及机理。

在今后的研究中,随着数字图像处理技术的发展,利用二值图像、多光谱图像来定量提取土壤孔隙度、弯曲度、孔隙分布等土壤物象信息,利用立体测量学、计算机断层扫描技术、激光共聚焦扫描技术等研究土壤孔隙的三维信息将更加普遍,从而全方位研究植被恢复过程中土壤孔隙结构、土壤团聚体以及土壤胶结物质等对土壤结构的影响。同时,要加强对植被恢复下土壤结构及其功能关系的定量研究,建立统一的土壤功能分类系统以及评价指标,为定向培育土壤功能所需的土壤结构及其技术开发提供理论基础。

参考文献:

- [1] Amézketa E. Soil aggregate stability: a review[J]. *Sustain. Agric.*, 1999, 14(2): 83-151.
- [2] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil Till. Res.*, 1988, 11(3/4): 199-238.
- [3] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618-623.
- [4] 赵其国等. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 蒋端生, 曾希柏, 张杨珠, 等. 土壤质量管理: 土壤功能和土壤质量[J]. *湖南农业科学*, 2008(5): 86-89.
- [6] FAO. World soil charter [M]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 1982.
- [7] 吴貽忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [8] 孙波, 解宪丽. 全球变化下土壤功能演变的响应与反馈[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 903-909.
- [9] 赵其国, 孙波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*, 1997, 29(3): 113-120.
- [10] European Commission. Towards a thematic strategy for soil protection[C] // Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Commission of the European Communities, Brussels, 2002.
- [11] Thompson T R E, Truckell I. Protecting Hampshire's Soils: Development of a soil function-based methodology[C]. NSRI Project TF1018V, 2005.
- [12] Commission of the European Communities. Directive of the European Parliament and of the Council, establishing a framework for the protection of soil and amending[M]. Directive 2004/35/EC, Brussels, 2006.
- [13] 姜明, 吕宪国, 杨青. 湿地土壤及其环境功能评价体系[J]. *湿地科学*, 2006, 4(3): 168-173.
- [14] 崔巍, 李伟, 张曼胤, 等. 湿地土壤生态功能研究概述[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(20): 203-207.
- [15] 何跃, 张甘霖, 杨金玲, 等. 城市化过程中黑碳的土壤记录及其环境指示意义[J]. *环境科学*, 2007, 28(10): 2369-2374.
- [16] 梁思源, 吴克宁. 土壤功能评价指标解译[J]. *土壤通报*, 2013, 44(5): 1035-1040.
- [17] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340-347.
- [18] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1949(14): 20-23.
- [19] Gardner W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution [J]. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1956(20): 151-153.
- [20] 赵世伟, 苏静, 杨永辉. 宁南黄土地丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27-28, 69.
- [21] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 半湿润区长期施肥对土壤结构体分形特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 417-422.
- [22] 周虎, 吕貽忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [23] Peyton R L, Gantzer C J, Anderson S H, et al. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X-ray computed-tomography [J]. *Water Resources Res.*, 1994, 30(3): 691-700.
- [24] Sander T, Gerke H H, Rogasik H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2008, 145(3): 303-314.
- [25] Udawatta R R, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influ-

- ence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics[J]. *J. Environ. Qual.*, 2008, 37(1): 219-228
- [26] Zeng Y, Gantzer C J, Payton R L, et al. Fractal dimension and lacunarity of bulk density determined with X-ray computed tomography[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60(6): 1718-1724.
- [27] 吴华山, 陈效民, 陈桀. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 175-178.
- [28] 冯杰, 郝振纯. CT 扫描确定土壤大孔隙分布[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5): 611-617.
- [29] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J. Computed-tomographic measurement of soil macroporosity parameters as affected by stiff-stemmed grass hedges[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2005, 69(5): 1609-1616.
- [30] Zhao S W, Zhao Y G, Wu J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, 40(2): 223-231.
- [31] 朱兆龙, 何东健, 李敏通. 一种土壤团聚体稳定性评估系统[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010(S1): 152-159.
- [32] Zhu Z L, Minasny B, Field D J. Measurement of aggregate bond energy using ultrasonic dispersion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(4): 695-705.
- [33] Blum W E H, Santelises A A. A concept of sustainability and resilience based on soil function[C]// Greenland D J, Szabolcs I. *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. Wallingford U K: CAB International, 1994.
- [34] 林大义. 土壤学试验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 70-72.
- [35] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 359-366.
- [36] 史弈, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1491-1494.
- [37] Puget P, Chenu C, Balesden t J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(4): 595-605.
- [38] 朱显谟. 黄土高原土地的国土政治问题[J]. *水土保持学报* 1984, 4(4): 1-4.
- [39] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2400-2407.
- [40] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. *土壤学报*, 1986(4): 299-305.
- [41] 勃海锋, 刘国彬, 王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(3): 1-5.
- [42] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1389-1392.
- [43] 刘娜娜, 赵世伟, 王恒俊. 黄土丘陵沟壑区人工柠条林土壤水分物理性质变化研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 15-17.
- [44] 刘娜娜, 赵世伟, 杨永辉, 等. 云雾山封育草原对表土持水性的影响[J]. *草地学报*, 2006, 14(4): 338-342.
- [45] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1040-1045.
- [46] Lal R. World soils and greenhouse effect. *IGBP Global Change Newsletter*, 1999(37): 4-5.
- [47] 彭少麟, 李跃林, 任海, 等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. *地球科学进展* [J], 2002, 17(5): 705-713.
- [48] 王发刚, 王启基, 王文颖, 等. 土壤有机碳研究进展[J]. *草业科学*, 2008, 25(2): 48-54.
- [49] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and macroaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [50] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393.
- [51] Johnston M H, Homann P S, Engstrom J K, Grigal D F. Changes in ecosystem carbon storage over 40 years on an old-field/forest landscape in east-central Minnesota[J]. *Forest Ecology and Management*, 1996, 83(1/2): 17-26.
- [52] Conant R T, Paustian K, Elliott E T. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 343-355.
- [53] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [54] 华娟. 宁南山区植被恢复的土壤碳库特征及固碳机制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [55] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-524.
- [56] 郭然, 王效科, 逯非, 等. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 862-867.
- [57] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 463-469.
- [58] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.