

土壤颗粒固碳及影响因素研究进展

崔国贤¹, 关松² (1. 延边大学, 吉林延吉 133002; 2. 吉林农业大学资源与环境学院, 吉林长春 130118)

摘要 简要概述了各国学者通过物理分组对各级土壤颗粒对土壤有机碳截获作用的研究, 同时也对在土壤管理中耕作、施肥及土地利用方式等人为活动对团聚体固碳的影响进行了综述, 提出应加强对团聚体物理保护—有机质化学结合与稳定的研究, 为农田土壤固碳和减排提供理论依据。

关键词 土壤团聚体; 固碳; 土壤有机质

中图分类号 S153.62 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)22-10611-04

Research Progress in Carbon Sequestration of Soil-partical and Influencing Factors

CUI Guo-xian et al (Yanbian University, Yanji, Jilin 133002)

Abstract Study of interception effects of each grades of soil particles on soil organic carbon through physical fractionation by scholars were summarized, study of combination and stability of soil aggregates physical protection-organic chemistry should be strength, which provided theoretical basis for carbon sequestration in soil and emission reduction.

Key words Soil aggregates; Carbon sequestration; Soil organic matter

土壤贮存着总陆地碳的约 70%, 增加土壤碳截存对缓解大气 CO₂ 浓度升高、防治土地退化、提高土壤质量和生产力等都会产生积极的影响^[1]。土壤是一个巨大的碳沉降库, 通过微生物分解将植物体转变成有机质存贮起来。土壤中各级微粒是土壤的重要组成部分, 在自然条件下, 土壤中的矿物颗粒和有机质颗粒极少单独存在, 它们均通过一定的作用力相互结合在一起, 形成各种类型的有机无机复合体、大团聚体和微团聚体。有机无机复合体和团聚体成为土壤有机质保持的场所, 对固碳和土壤肥力都十分重要, 在有机无机生物的相互作用下, 有机无机复合体和团聚体中有机碳的化学变化及其物理结合应该是有机碳固定及保护机制的基本问题。因此, 通过土壤团聚体分级和颗粒分级, 研究土壤团聚体和不同颗粒组分对土壤有机碳的截获作用, 明确其对土壤固碳和肥力的贡献份额具有重要的意义, 国内外学者也进行了大量的相关研究, 从而为提高土壤有机碳储量提供了理论依据。

1 团聚体分组中有机碳的研究

土壤团聚体特别是微团聚体, 是土壤有机质分解转化和腐殖物质形成的最主要“场所”。根据已提出的几种关于有机质稳定土壤团聚体的理论, <0.250 mm 微团聚体和 >0.250 mm 大团聚体的稳定作用有不同机制。许多学者通过研究证实大团聚体比微团聚体包含更多的有机碳和氮(但大团聚体所占比例或者说数量却较小)^[2-5]、微粒有机质^[6] 和不稳定土壤有机质, 大团聚体中有机质的特征是更易分解^[2-3,5]。大团聚体有机碳含量高, 有以下原因: 有机质把微团聚体胶结成团聚体^[5]; 在大团聚体中处于分解状态的根系和菌丝可以增加大团聚体中有机碳的浓度^[7]。

利用¹³C 自然丰度法对玉米地水稳性各级团聚体中有机碳(<15年)进行了准确测定, 在大团聚体中富含新近沉积的碳, 平均在 >1.000 mm 的水稳性大团聚体中 20% 的碳来自玉米, 在全土中是 9%, 微团聚体中是 1%^[8]。大团聚体中新碳的积累或者说高的有机碳浓度可以提高大团聚体的稳

定性^[9], 其本质是取决于分解状态的植物根系、菌丝、不稳定碳水化合物、脂肪族化合物^[7,9-10], 当根系和菌丝被分解而得不到补给时, 稳定性大团聚体的数量随有机质含量的降低而减少^[10]。

关于大团聚体中有机碳易分解不稳定, 可能源于嵌在大团聚体内的微生物和微生物分解产物^[11], 因为常规耕作往往通过增加通气和打碎土壤团聚体, 使难以接近的有机质暴露, 受到微生物攻击, 导致大团聚体组分内的养分消耗, 使胡敏酸和富里酸等胶体组分伴随后来的有机组分, 相对富集在微团聚体中^[12]。Cambardella 等^[6]认为大团聚体含有的有机质是轻组微粒有机质或相对密度较小且与粘土矿物结合不紧密。大粒级微团聚体的形成主要与松结态有机质及多糖类物质有关, 而小粒级微团聚体的形成则主要受紧结态有机质和粘粒的影响。

但也有不同的研究结果, Søren M. 等^[13]用¹⁴C 标记的黑麦草添加到丹麦耕种的土壤中培养了 8 个月, 用 >0.063 mm 的砂粒颗粒校正后, 认为原土和¹⁴C 标记的有机质在微团聚体中比在大团聚体中含量高, 且随着微团聚体粒径的减小而增加。在 0.125~0.250 mm 微团聚体中的¹⁴C 比 0.250~2.000 mm 大团聚体中的¹⁴C 易分解, 不稳定。这 2 种不同的研究结果可能是不同的研究方法所致, 田间试验条件下, 土壤大团聚体中有机碳含量高, 而在室内培养条件下, 由于没有根系的输入, 可能导致相反的结果。

2 颗粒分组中有机碳的研究

根据已有研究, 颗粒分组多划分为: 粘粒(<2.00 μm)、粉粒(2.00~20.00 μm 或 2.00~50.00 μm)、砂粒(20.00~2000.00 μm 或 50.00~2000.00 μm), 有时还把粘粒区分为粗粘粒(0.20~2.00 μm)、中粘粒(0.02~0.20 μm)和细粘粒(<0.02 μm)组分, 这在表征土壤肥力功能和环境功能方面有着不可忽视的作用。

2.1 有机碳在砂粒、粉粒和粘粒中的分布 耕种土壤中, 约 50%~75% 有机碳与粘粒颗粒(<2.00 μm)相联, 约 20%~40% 有机碳与粉粒(2.00~63.00 μm)相联, <10% 有机碳与砂粒相连^[14], 也就是说粘粒中有机碳含量最高^[15]。土壤有机质含量与土壤细粒(粉粒和粘粒)含量具有较高的正相

作者简介 崔国贤(1971-), 男, 吉林龙井人, 工程师, 从事园林方面的研究。

收稿日期 2009-04-10

关性^[16]。

有机质是土壤团聚体的重要组成部分,其中,腐殖质是土壤团聚体重要的“有机胶结物质”^[17]。其组分胡敏酸、富里酸、胡敏素在团聚体内的形成与转化直接关系到土壤固碳能力的高低。墨西哥富含粘粒的火山岩地带粉粒和粘粒的C、N量主要是以胡敏素为主,这表明保存在粉粒和粘粒中的土壤有机质应该是稳定的,矿化率很小^[15]。在对美国爱荷华州耕种与免耕的草原及森林土壤有机质的研究中,发现当微团聚体粒径由粗粉粒向细粘粒减小时,土壤有机质C/N比值减小,从粉粒组分中提取的胡敏酸与富里酸比例比从粘粒中提取的高2~3倍^[18],而胡敏酸的分子结构及复杂程度均高于富里酸,因此这一研究表明了粉粒的固碳能力高于粘粒。Mao等^[19]关于胡敏酸分子结构的研究也证实了这一结论。Mao最近报道了与粉粒和粘粒相连的胡敏酸在它们的结构组成上是不同的,粘粒组分的胡敏酸比粉粒含有更易氧化的组分和脂肪族。Margit^[14]的研究表明随着颗粒级减小,芳香C损失,烷氧基和羧基C随着C/N比值的减少而减少,而烷基C相对含量增加。

有机质矿化速率随着团聚体变小而降低,主要是由于碳和粘粒、粉粒结合在一起而增加保护,不受微生物矿化的影响^[20-21]。综上所述,较砂粒来说,粉粒和粘粒更有利于有机碳的固定,而且,粘粒比粉粒中包含有更多的易氧化的组分和脂肪族及较低的HA/FA比值都表明粉粒更有利于有机碳的固定。

2.2 有机碳在粗、中、细粘粒中的分布 土壤有机质是全球主要碳贮库之一,土壤有机残体分解、土壤有机质矿化都会向大气中释放CO₂,土壤中进行植物残体分解和植物生产之间平衡关系的微小差异,就会导致大气中CO₂浓度的积累或亏欠,CO₂是重要的温室气体之一,因此土壤有机质在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面有着重要的作用和意义。而土壤有机质只有与矿质粘粒结合成有机无机复合体才能得以较长时间保存,这也是土壤固碳机理的一个方面。许多学者就土壤有机碳在粗、中、细粘粒中的分布数量及分子结构性质进行了研究。

Kleber等^[22-23]研究表明粗粘粒(0.20~2.00 μm)比细粘粒(<0.02 μm)容纳更多的有机碳,Margit也提到了在粗粘粒(0.20~2.00 μm)中碳分配的比例从全碳的30%~50%减少至细粘粒中全碳的4%~20%,并且细粘粒与粗粘粒相比,碳周转时间也减少。与腐殖物质相联接的细粘粒和粗粘粒分别在中期和长期有机质周转中起重要作用^[24]。Kahle^[23]等通过¹³C-NMR技术分析研究表明:贮藏在不同大小粘粒中的有机质化学成分不同。与粗粘粒(0.20~2.00 μm)相比,细粘粒(<0.20 μm)中容纳了更多的酮基、醛基、羧基和酚基C;较少的芳香、烷氧基和烷基C。David^[25]通过使用¹³C-CPMAS-NMR技术研究了与粗粘粒(0.20~2.00 μm)、中粘粒(0.02~0.20 μm)和细粘粒(<0.02 μm)相联的有机物料性质,粗粘粒中含有较多的芳香C,细粘粒中分布较少的芳香C,较多易氧化的烷基、烷氧基、酮基、醛基、羧基C,表明粗粘粒的固碳能力强于细粘粒。尽管细粘粒中有机碳含量低于粗粘粒,而且细粘粒中分布较少的芳香C,较多易氧化

的烷基、烷氧基、酮基、醛基、羧基C,但是有研究表明来自于植物物料的新C或新形成的腐殖质积累在细粘粒中。David^[25]的培养研究和¹⁴C标记的残茬研究都强烈表明从细粘粒和中粘粒中分离出来的有机物料比在粗粘粒中生物活性强。Kahle等^[23]的研究中,尽管细粘粒有较低的含C量和C/N比值,但却具有较高的δ¹³C值,这表明细粘粒中来自于植物组织的新C含量高于粗粘粒。Javier等^[24]通过¹⁴C同位素示踪技术研究了不同大小的粘粒对¹⁴C标记的残留根在粉壤土中培养360d被分解形成腐殖物质的作用不同,在0d和360d最高的¹⁴C活动发生在细粘粒(<0.02 μm)中,而最低的¹⁴C活动发生在粗粘粒(0.20~2.00 μm)中。这表明新形成的腐殖质更愿意形成或积累在细粘粒中。

在以上采用的先进、精确的研究方法中,相对于粗、中粘粒来说,细粘粒有机碳含量较低,有较多的酮基、醛基、羧基、酚基及烷基C,较少的芳香C,较短的有机质周转时间,及来自于植物物料的新C或者腐殖质形成都积累在细粘粒中,这些特点都表明粗粘粒比细粘粒更有利于有机碳的固定。

3 影响土壤团聚体稳定性及固碳的因素

土壤团聚体是土壤结构的基本单位,它的形成不仅是自然的过程,而且受到人类活动的严重影响,如土地利用变化、耕作干扰、有机肥施用等人类活动。土壤结构的改善不仅决定于输入有机碳的总量,而且与土壤有机质的组成和特征有关。因有机质的组成和特征不同,使微团聚体和大团聚体的稳定作用具有不同的机制。大团聚体主要依靠暂时的粘合物,而对土壤管理引起的有机质水平变化敏感,相反,微团聚体有相对高的稳定性不受物理破坏的影响,它们对有机质含量变化的反应很低^[26]。

3.1 耕作的影响 耕作强度、土壤结构和土壤有机质之间的关系已经引起人们的广泛关注。耕作强度的增加使团聚体稳定性降低,土壤中碳含量较高的大团聚体比例减少,碳含量较低微团聚体比例增加,导致土壤有机碳减少^[27]。

一些研究^[28-30]显示,对于免耕作土壤,0.250~2.000 mm粒级的大团聚体占有较大比例,0.053~0.250 mm微团聚体所占比例较小,有机碳优先分布在>2.000 mm的大团聚体中,而且随着团聚体粒级的减小有机碳呈减少趋势。对于耕作土壤,0.053~0.250 mm微团聚体和0.250~0.500 mm大团聚体比例较大,即耕作显著减少了大团聚体(>0.250 mm)至较小粒径。同时,减少了大团聚体(>0.500 mm)中有机碳量,而且有机碳优先分布在<0.250 mm微团聚体中,即耕作导致随着水稳性团聚体粒级减小而有机碳增加,这可能部分归因于有机质从大团聚体向微团聚体的重新分配和转移,既是在生物降解过程中,也在大团聚体被破坏的过程中发生^[12]。耕作土壤中微团聚体(0.053~0.250 mm)C、N量显著高于免耕作土壤,一方面归因于这一粒级在耕作土壤中占有较大比例,另一方面,Oades等^[31]研究表明当支撑大团聚体的根和菌丝死亡或被耕作和动物群落破坏时,分解的碎片很可能在0.020~0.250 mm微团聚体中成为有机核,从而增加了微团聚体中的C、N量。Karolien等^[32]从被禁锢在大团聚体内部的微团聚体C的稳定性角度进行了研究,认为被禁锢在大团聚体内部的微团聚体(Mm)(特别是

与 <0.053 mm 的微小团聚体相连接的矿物组分)是长期 C 的固定场所,而且随着传统耕作向免耕作管理的转化,Mm 能够成为潜在的全土有机 C 固定的指示因子。研究结果也表明:在自然的和改良的农业系统中,首先是 Mm-C 具有稳定性,其 C 的固定并不直接与 Mm 具有很大数量直接相关,相反地,是由于 Mm 具有较大的稳定性及较慢的周转引起的。

以上耕作活动对土壤的影响主要是改变了土壤有机碳的分布和微生物的活动环境,为土壤有机物质的分解转化创造了条件及由此造成团聚体的变化。耕作强度增加可促进土壤有机质周转,减少土壤团聚作用的发生。

3.2 有机肥施用的影响 施肥对大团聚体的影响程度要高于小团聚体^[33-37],使大团聚体比例增加,而且,随着添加残体数量的增加,>2.000 mm 大团聚体数量从 3% 增加到 40%^[38]。当新鲜有机残茬进入土壤时,大团聚体成为微生物活动的场所和团聚体的核心^[3,39]。

不同施肥方式对于土壤大团聚体形成的促进作用和土壤有机碳含量影响有所不同。猪粪的施用能明显增加土壤有机碳和松、稳结态腐殖质含量,1.000~0.250 mm 团聚体含量与重组碳呈显著正相关,而 <0.250 mm 各级团聚体则与土壤重组碳呈负相关^[40-41]。绿肥、秸秆还田等培肥后,>0.250 mm 水稳性团聚体在培肥土壤中所占比例的顺序为:绿肥、麦秸各半区 > 麦秸区 > 绿肥区 > 土杂肥区 > 对照区^[42]。Zhihui Yang 等^[33]研究认为,与施用 NPKS 和 NK 矿质肥料相比,中等水平(600 kg/hm²)和高水平(900 kg/hm²)农家肥的施用增加了大粒级水稳性团聚体(>2.000 mm)的比例,而对其他粒级没有产生影响。长期施用高水平的农家肥使全 C、N、S 分别增加了 63%、50% 和 37%,而中等水平的农家肥处理没有这种现象。尽管施用矿质肥料也能增加 C、N 和 S 量,但影响不显著。

还有报道显示,有机培肥后使 10.00~50.00 μm 和 50.00~250.00 μm 的胡敏酸(HA)与富里酸(FA)之和与胡敏素(HM)的比值提高,且随粒级增大提高的幅度增大;HA 的 ΔlogK 和活化度均增加,RF 降低,且对 50.00~250.00 μm 中 HA 的影响最大^[43-44]。

从近 20 年研究和完善中可以看出,土壤团聚体周转和有机质动态变化之间的关系愈来愈清晰,有机质分解加快或补充减少是导致团聚体水稳性下降的主要原因。团聚体形成的核心 POM 有可能用于因土壤管理方式改变而引起的土壤有机质早期变化的定量研究。

3.3 土地利用变化的影响 与林地、草地相比,农田 >0.250 mm 水稳性团聚体数量较少^[45-47]。各种利用方式下,>1.000 mm 的团聚体数量顺序为:草地 > 森林 > 耕地,玉米地 > 小麦地;0.053~0.250 mm 和 0.250~1.000 mm 的顺序相反。与传统粮田相比,果园和苜蓿地土地利用方式明显提高了土壤中 >2.000 mm 和 >0.250 mm 水稳性团聚体的比例,同时也降低了 0.500~1.000 mm 和 0.250~0.500 mm 粒级的水稳性团聚体比例。设施农业用地降低了土壤较大粒级水稳性团聚体比例和团聚体的稳定性^[48],说明耕作等人为活动和农机具使用使大团聚体比例减少^[49]。同一粒级团聚体有机碳含量为林地 > 草地或园地 > 农田^[50-51],或者果

园 > 苜蓿地 > 设施农业用地^[48]。

4 讨论

综合研究进展和认识,土壤的固碳机理可能是:团聚体有机碳固定中首先是输入新碳的物理保护,进一步经受化学转化与结构稳定化,同时因碳库性质和分配的改变也导致团聚体尺度微生物生境的多样化和微生物区系演变、功能群及酶活性等肥力服务功能的变化,促进多样性生物区系的发展,从而稳定了生态系统过程^[52]。因此应进一步加强对农田土壤团聚体物理保护—有机质化学结合与稳定过程的研究,无论是对于农田土壤固碳减排还是提高土壤肥力、维持农业可持续发展都具有重要的意义。

参考文献

- [1] 马红亮,朱建国,谢祖彬. 大气 CO₂ 浓度升高对陆地生态系统土壤固碳的可能影响[J]. 土壤通报,2008,39(5):1184-1191.
- [2] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen distributions in aggregates from cultivated and grassland soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57:1071-1076.
- [3] PUGET P, CHENU C, BALESSENT J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils[J]. Eur J Soil Sci, 1995, 46: 449-459.
- [4] SPACCINI R, ZENA A, IGWE C A, et al. Carbohydrates in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems[J]. Biogeochemistry, 2001, 53:1-22.
- [5] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50:627-633.
- [6] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Sci Soc Am J, 1992, 56: 776-783.
- [7] TISDALL J M, OADES J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth[J]. Aust J Soil Res, 1980, 18:423-433.
- [8] ANGERS D A, GIROUX M. Recently deposited organic matter in soil water-stable aggregates[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60:1547-1551.
- [9] PUGET P, ANGERS D A, CHENU C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils[J]. Soil Bio Biochem, 1999, 31(1):55-63.
- [10] JASTROW J D, MILLER R M, LUSSENHOP J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie[J]. Soil Biol Biochem, 1998, 30(7):905-916.
- [11] FRANZLUEBBERS A J, ARSHAD M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture[J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61:1382-1386.
- [12] PARDO M T, GIEMPAOLO S, ALMENDRUS G. Effect of cultivation on physical speciation of humic substances and plant nutrients in aggregate fractions of crusting soil from Zimbabwe[J]. Biol Fertil Soil, 1997, 25:95-102.
- [13] SØREN M KRISTIANSEN, PER SCHJØNNING, INGRID K, et al. Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture [J]. Geoderma, 2006, 137:147-154.
- [14] MARGIT VON LÜTZOW. SOM fractionation methods; Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39:2183-2207.
- [15] SARA COVALEDA, SILVIA PAJARES, JUAN F, et al. Short-term changes in C and N distribution in soil particle size fractions induced by agricultural practices in a cultivated volcanic soil from Mexico [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(12):1943-1948.
- [16] GALANTINI J A, SENESI N, BRUNETTI G, et al. Influence of texture on organic matter distribution and quality and nitrogen and sulphur status in semiarid Pampean grassland soils of Argentina [J]. Geoderma, 2004, 123: 143-152.
- [17] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2001:83.
- [18] ZHANG H, THOMPSON M L, SANDOR J A. Compositional differences in organic matter among cultivated and uncultivated Argiudolls and Hapludalfs derived from loess [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52:216-222.
- [19] MAO J D, FANG X, SCHMIDT-ROHR K, et al. Molecular-scale heterogeneity of humic acid in particle-size fractions of two Iowa soils [J]. Geoderma, 2007, 140:17-29.
- [20] VERBERNE E L J, HASSINK J, DE WILLIGEN W, et al. Modelling or-

- ganic matter dynamics in different soils[J]. *Neth J Agr Sci*,1990,38:221-238.
- [21] HASSINK J. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter[J]. *Soil Sci Soc Am J*,1995,59:1631-1635.
- [22] KLEBER M, MERTZ C, ZIKELI S, et al. Changes in surface reactivity and organic matter composition of clay subfractions with duration of fertilizer deprivation[J]. *European Journal of Soil Science*,2004,55:381-391.
- [23] KAHLE M, KLEBER M, TORN M S, et al. Carbon storage in coarse and fine clay fractions of illitic soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2003,67(6):1732-1739.
- [24] JAVIER M, GONZALEZ, DAVID A LAIRD. Carbon sequestration in clay mineral fractions from ¹⁴C & labeled plant residues[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2003,67(6):1715-1720.
- [25] DAVID A LAIRD, MARK A CHAPPELL, DEAN A MARTENS, et al. Distinguishing black carbon from biogenic humic substances in soil clay fractions[J]. *Geoderma*,2008,143:115-122.
- [26] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Soil Sci*,1982,33:141-163.
- [27] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Sci Soc Am J*,2000,64:681-689.
- [28] ADESODUN J K, ADEYEMI E F, OYEGOKO C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses[J]. *Soil & Tillage Research*,2007,92:190-197.
- [29] ASHAGRIE Y, ZECH W, GUGGENBERGER G, et al. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia[J]. *Soil & Tillage Research*,2007,94:101-108.
- [30] MARCOS D, BONGIOVANNI, JUAN C, et al. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation[J]. *Geoderma*,2006,136:660-665.
- [31] OADES J M, WATERS A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Aust J Soil Res*,1991,9:815-828.
- [32] KAROLIEN DENEFF, LINCOLN ZOTARELLI, ROBERT M BODDEY, et al. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2007,39:1165-1172.
- [33] ZHIHUI YANG, BAL RAM SINGH, SISSEL HANSEN. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils[J]. *Soil & Tillage Research*,2007,95:161-171.
- [34] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. *土壤学报*,2007,44(4):675-682.
- [35] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J]. *中国农业科学*,2005,38(9):1841-1848.
- [36] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*,2006,43(3):422-429.
- [37] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布和有机碳、氮含量的影响[J]. *土壤*,2007,39(5):787-793.
- [38] STEVEN DE GRYZE, JOHAN SIX, CYNTHIA BRITS, et al. A quantification of short-term macroaggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2005,37:55-66.
- [39] JASTROW J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,1996,28(4/5):665-676.
- [40] 李映强, 曾觉廷. 不同耕作制度下水稻土有机质变化及其团聚作用[J]. *土壤学报*,1991,28(4):404-409.
- [41] 姚贤良, 于德芬. 关于集约农作制下的土壤结构问题——I. 有机物料及其利用方式对土壤结构的影响[J]. *土壤学报*,1985,22(3):241-249.
- [42] 黄不凡. 施用绿肥和小麦秸秆对土壤团聚体和有机质特性的影响[J]. *土壤学报*,1984,21(2):113-122.
- [43] 窦森, 张继宏, 须相成. 棕壤不同粒级微团聚体中有机质特性的研究[J]. *土壤通报*,1992,23(2):52-54.
- [44] 窦森. 土壤有机培肥对棕壤胡敏酸光学特性及活化度的影响[J]. *吉林农业大学学报*,1992,14(3):47-53.
- [45] 章明奎, 何振立, 陈国潮. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*,1997,34(4):359-366.
- [46] ZHANG M K, HE Z L, CHEN G C, et al. Formation and water stability of aggregates in red soil as affected by organic matter[J]. *Pedosphere*,1996,6(1):39-45.
- [47] 侯春霞, 骆东齐, 谢德体. 不同利用方式对紫色土团聚体形成的影响[J]. *西南农业大学学报*,2003,25(5):467-470.
- [48] 杨长明, 欧阳竹. 华北平原农业土地利用方式对土壤水稳性团聚体分布特征及其有机碳含量的影响[J]. *土壤*,2008,40(1):100-105.
- [49] YAMASHITA T, FLESSA H, JOHN B, et al. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: effect of land use[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2006,38:3222-3234.
- [50] JOHN B, YAMASHITA T, LUDWIG B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. *Geoderma*,2005,128:63-79.
- [51] 杨建国, 安韶山, 郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J]. *水土保持学报*,2006,20(1):74-77.
- [52] 潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. *土壤学报*,2008,45(5):901-914.

(上接第10604页)

度是衡量土地利用规划实施成功与否的重要方面。公众参与程度主要描述社会公众对土地利用总体规划的了解、认知以及参与程度等^[4]。

2.5 规划实施守法因子 在规划实施中违法用地数量的多少关系着土地利用总体规划实施的成败,然而,规划实施中基层政府可能会为了地方经济利益或者部门利益而不遵守土地利用规划、无视规划的严肃性、随意减少农用地面积、扩大建设用地面积。这些都会使本来科学合理的规划大打折扣,所以,在评价土地利用规划实施情况时必须考虑规划实施的守法状况。

3 总结

上述5大类23个指标基本上涵盖了土地利用总体规划实施的各个方面,应用到具体区域时,还可以根据当地土地利用总体规划的特点增加或减少若干个指标。以往很多研究还赋予各指标不同的权重,再通过数学方法将各指标数据

进行变换,得出一个反映土地利用总体规划实施状况的指数。笔者认为,土地利用总体规划实施评价的目的并不是要得出某一个综合评价指数,而是要在评价的过程中发现问题,指导规划实施有效进行。进行数理分析后得到的指数虽然简单、明了,但是会掩盖一些具体的问题,所以在规划评价体系设计时舍去了繁琐的数理变换,以指标的原始数据作为评价的依据,这样便于找出规划实施中存在的问题,以助于更明确地将评价结果反馈于规划实施过程。

参考文献

- [1] 赵小敏, 郭熙. 土地利用总体规划实施评价[J]. *中国土地科学*,2003,17(5):35-40.
- [2] 贺美利, 周勇. 我国土地利用规划实施评价的研究现状[J]. *国土资源科技管理*,2008(2):45-48.
- [3] 余向克, 邓良基, 李何超. 土地利用规划实施评价方法探析[J]. *国土资源科技管理*,2006(1):34-35.
- [4] 夏春云, 严金明. 土地利用规划实施评价的指标体系构建[J]. *中国土地科学*,2006(2):19-23.