

①

土壤团聚体研究进展

卢金伟, 李占斌

中国科学院
(水利部) 水土保持研究所, 陕西杨陵 712100

摘要: 土壤团聚体是土壤的重要组成部分, 影响了土壤的各种物理化学性质, 对土壤侵蚀有重要影响, 其水稳性和数量是评价土壤可蚀性的重要评价指标。综述了土壤团聚体的形成、影响土壤团聚体水稳性的因素、以及土壤团聚体研究方法的研究的最新进展, 针对其中存在问题, 指出今后可能的发展方向。

关键词: 土壤团聚体; 水稳性; 因素; 进展

中图分类号: S 152.4

文献标识码: B

文章编号: 1005-3409(2002)01-0081-05

Advance in Soil Aggregate Study

LU Jin-wei, LI Zhan-bin

(Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Soil aggregate is the main component of soil. It has an important effect on soil physical and chemical characteristics and soil erosion. The quality and quantity of soil water stable aggregates were selected as the main index to assess soil erodibility. Based on reviewing the history and present situation of the study on soil aggregates, the developments in the forming mechanism, the factors influencing water stability and breakdown mechanism were summarized. Finally the main question and future of the research in this field were put forward.

Key words: soil aggregate; water stability; factors; advance

土壤团聚体是土壤的重要组成部分, 影响了土壤的许多物理化学性质。近几十年来, 国内外土壤研究者对土壤有机无机复合与土壤团聚体形成之间的关系作了大量研究。这些研究主要认为有机无机复合是土壤中水稳性团聚体形成的重要机制和物质基础。土壤抗蚀性(或抗冲性)取决于土粒和水之间的亲和力。亲和力越大土壤颗粒越易分散和悬浮, 团聚体结构也越容易受到破坏和解体, 同时导致土壤透水性能降低, 因而在这种情况下, 即使径流很小也会发生侵蚀。如果土壤颗粒间胶结力很强, 土壤团聚体结构体大, 则团粒结构体间相互不易分离, 可以抵抗较强的冲刷作用。土壤团聚体结构、其稳定性与影响其水稳定性的因素的研究作为土壤学以及土壤侵蚀

学研究的重要方面, 受到国内外学者的广泛关注并从事不同角度开展了大量研究工作。现将之总结如下:

1 土壤团聚体的形成机制的研究

早期研究认为黏粒间的结合主要基于颗粒结合的几何关系和水膜理论。Emerson^[1](1957, 1977)把彼此靠的很近的平行黏土晶体称为黏团, 认为有机质主要通过形成并加强黏团之间, 以及石英颗粒与黏团之间的键合来稳定团聚体。50~60年代, 土壤团聚体形成机制的研究有了新的进展。东欧土壤学家提出了团聚体的多级形成学说, 西方土壤学者提出了土壤团聚体形成的黏团学说。1967年, Edwards和Bremner^[2]提出了一个以有机无机复合体为基础

① 收稿日期: 2001-10-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-10-04)

作者简介: 卢金伟, 男, (1976-), 山东枣庄人, 在读硕士, 已发表科研论文3篇, 主要从事土壤侵蚀与环境演变方向研究。

的团聚体形成模式。Greenland D. J.^[3] (1961)、M. V. Cheshire^[4] (1979)、M. Ben-Hur^[5] (1989) 等对土壤多糖与土壤水稳性团粒作了较深入的研究后提出团聚作用与土壤有机质含量之间的关系实际上是与土壤多糖之间的关系, 并且团聚作用主要是由多糖引起的观点。1982年, Tisdall 和 Oades^[6] 在剖析土壤团聚体中各种不同大小结构单元及各种胶结剂的组成的基础上, 提出了团聚体的组成及其主要胶结剂的理想模式。Quirk 和 Aylmore^[7] 把蒙脱石中平行排列的各铝硅酸盐层(quasi-crystal), 他有晶体内膨胀; 他们把伊利石和具有固定晶格的其它黏土的平行排列的晶体称为黏团, 他们只有晶体间膨胀。已有几种模式用来描述各个矿物颗粒相互连接形成水稳性团聚体的方式。Misuno 和 Sudo 提出直径小于 20 μm 的颗粒可连接成直径为 20 ~ 60 μm 的二级水稳性颗粒。它们再形成更大些的土壤团聚体。Edward 和 Bremner^[2] 提出大团聚体(直径大于 250 μm) 由黏粒-多价金属-有机质(C-P-OM) 复合体组成, 其中, 黏粒通过多价金属与腐殖化的有机质键合。C-P-OM 和(C-P-OM)_x 的颗粒(直径都小于 2 μm) 一起形成直径小于 250 μm 的微团聚体(C-P-OM)_x。也可能存在 C-P-C 和 OM-P-OM 键, 甚至氧化铝或氧化铁或氢键。Edwards 和 Bremner^[2] 也提出几个腐殖化的有机质碎片也可以键合到几个黏粒上。R. K. Chatterjee 和 J. K. Jain 在研究胶结物质对团粒构成影响时发现微生物黏胶是大团聚体(粒径大小为 0.2 ~ 2.0 mm) 构成的最重要的因素, 而铁铝的三氧化二物是构成微团聚体(粒径大小为 < 0.2 mm) 的最重要的胶结物质。土壤团粒结构形成机制近 20 年进展缓慢, 一般认为土壤团粒形成最重要的机制是黏粒或羟基聚合物表面和有机聚合物配位基团(即羧基) 之间的多价阳离子桥键合, 但是这些理论仅仅是个假说, 还没有得到科学的数据验证。

2 影响土壤团聚体稳定性因子研究

影响土壤团粒稳定性的主要因子有土壤有机质的含量、土壤微生物、土壤利用方式等。

2.1 土壤有机质对土壤团聚体的稳定性的影响

国内外学者对土壤团聚体的水稳性与有机质含量之间的相关性已作了相当多的研究。Braver (1940) 发现直径小于 0.05 mm 团聚体的数量与有机质的含量相关系数约为 0.65 ~ 0.75。魏朝富^[7] (1995)、章明奎 (1997) 对紫色土、红壤水稳性团聚

体研究时发现水稳性团聚体数量与稳定性均和土壤有机质的含量呈正相关。早在 1963 年, A. Ф. ТЮЛИН 根据 ТаПОН 提出的有机矿质复合体的结构模型作为其分组的理论依据, 把土壤微团粒分为胡敏酸钙团聚体(G1) 和胡敏酸铁团聚体(G2) 两大类。Greenland D. J.^[3] (1961)、M. V. Cheshire^[4] (1979)、M. Ben-Hur^[5] (1989) 等对土壤多糖与土壤水稳性团粒作了较深入的研究后提出团聚作用与土壤有机质含量之间的关系实际上是与土壤多糖之间的关系。Alessandro Piccolo 和 Joe S. Cmbagwu (1999) 研究发现土壤有机质中斥水胡敏酸可有效增加土壤团聚体的稳定性。姚贤良 (1996)、关连珠^[10] (1991)、魏朝富^[11] (1996) 等对红壤、黑土、棕壤、紫色土团聚体的胶结物质的组成和存在状态进行了研究认为有机无机复合和土粒团聚的关系是通过原土复合量和小于 0.01 mm 土粒团聚量的关系具体体现。M. Aoyama, D. Aangers (1999) 等研究矿质肥料和施入有机质对土壤团聚体中有机无机复合体的影响。但是土壤水稳性团聚体与有机质的含量之间的相关性并不好, 原因如下: (1) 仅部分有机质是造成水稳性团粒的原因; (2) 有机质超过一定含量后, 水稳性团粒不再随有机质的含量的增加而增加; (3) 有机质不是土壤团粒的主要胶结剂; (4) 重要的是有机质的排列, 而不是其类型和数量在对土壤团粒的水稳性产生影响; (5) 生荒地土壤中水稳性团粒稳定性主要与一些土壤物理因素有关。总之, 对有机质的研究还不深入, 还没有弄清有机质在土壤团聚体形成和稳定所起的作用。

2.2 土壤微生物与土壤团聚体稳定性的关系

微生物在土壤团聚体形成中的作用主要有两个方面: (1) 微生物主要是真菌和放线菌借助他们的菌丝将土壤颗粒彼此机械的缠绕在一起而形成团聚体; (2) 依靠微生物的代谢产物(多糖和其他有机物) 对土壤颗粒的胶结作用而形成稳定性团聚体。这和根系在土壤团聚体形成中的作用基本类似。关于微生物与土壤团聚体稳定性的关系研究也不少。国外的 Martin^[12]、Griffiths、Allison^[13] 及 Skinner^[14] 和国内的郝余祥^[21] 等人已先后就土壤微生物在团聚体形成中的作用、团聚体的微生物组成及其组成和研究方法等方面进行了较深入的研究。Birgitte Neergaardhe 和 Leif Petersen^[15] (2000) 研究表明真菌菌根可有效提高土壤结构和土壤团聚体稳定性。G. Andrade, K. L. Mihara 等(1998) 研究认为分支根瘤中根瘤菌可明显提高土壤团聚体稳定性。J. M. Tisdall (1993) 研究了土壤微生物在土壤团聚体形成

中的作用, 认为 VAM 菌丝及它们分泌的土壤多糖 (包括其它有机质) 对土壤团聚体的形成具有重要的影响。以上研究虽然对微生物在土壤团聚体形成中的作用进行了较深入的研究, 但是对微生物在土壤团聚中到底怎样起作用的尚不清楚。

2.3 土壤胶结物质的研究

土壤团聚体的胶结物质可分为有机胶结剂和无机胶结剂两类。无机胶结剂可视为永久胶结剂, 如果其占主要成分, 有机胶结剂则没有特别的作用, 基本不影响土壤的物理性质。章明奎等^[25] (1996) 在对南方红壤地区的土壤团聚体组成研究后发现微水稳性团聚体 (粒径大小为 0.25 ~ 0.5 mm) 的主要胶结物质是铁、铝的氧化物, 而大团聚体 (粒径大小为 > 0.5 mm) 的主要胶结物质是有机质。有机胶结剂则可分为瞬变性、临时性和持久性三大类。瞬时性胶结剂是易被土壤微生物快速降解的有机物质, 最重要的是多糖, 它主要与大的暂时稳定的团聚体有关。Griffiths、Jones^[13] (1965) 和 M. Vcheshire^[4] (1979) 等研究了加入有机质后土壤团聚体的水稳性的变化。Tisdall^[17] 等 (1997) 研究表明临时性有机质包括真菌分泌物将矿物颗粒和有机质黏结起来形成 72 μm 的稳定团聚体, 进而可形成 > 50 μm 的团聚体。Chenu^[18] (1989) 研究发现植物和微生物分泌的多糖可使 > 250 μm 的土壤团聚体更加稳定。临时性胶结剂有根和菌丝, 其经常受土壤管理的影响, 它主要与形成较晚的大团聚体有关。R. G. Donald 和 B. D. Kay^[19] (1987) 等研究玉米的嫩芽和根生长对土壤团聚体稳定性的影响。Henness, E^[31] 等 (1982) 认为由菌丝形成的团聚体在土壤中的存在是短暂的。持久性胶结剂由芳香胡敏酸物质与无定形的铁、铝和铝硅酸盐缔合而形成有机无机复合体。许多科学家如 M. J. Morra 等^[20] (1991) 先后研究了有机无机复合体与土壤团聚体稳定性的关系。综上所述, 虽然对土壤胶结物质作了不少研究, 但对哪一种胶结剂在土壤团聚中起主要作用以及怎样起作用尚不清楚。

2.4 土壤利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

土地利用方式的不同影响了作物的生产和土壤的物理性质, 特别是土壤孔隙度、土壤密度、抗剪强度、土壤容重、土壤渗水性和水力传导度等影响更大。关于土壤利用方式对土壤团粒水稳性的影响方面的研究, 国内外也不少。J. S. C. Mbagwu^[21] (1989) 研究了耕作措施对土壤团聚体稳定性的影响, 发现耕作使土壤团聚体的稳定性降低, 各级大小团聚体中氮、磷的含量较未耕土壤低。S. F. Wright 等^[22] (1999) 研究了不同的耕作管理措施对土壤团

聚体稳定性的影响。B. R. Ball-Coelho 等 (2000) 研究了耕作和谷物覆盖对沙壤中团聚体稳定性的影响。李映强、曾觉廷^[23] (1991) 研究了不同耕作制下水稻土有机质及其团聚作用的变化。章明奎、何振立等^[8] (1997) 研究了 5 种利用方式对红壤水稳性团聚体形成的影响。Magarao、姚贤良等也就此作了研究, 认为不同利用方式对土壤团粒的数量和稳定性影响较大。总之, 虽然已认识到土壤利用方式对土壤团聚体稳定性的影响, 但这些研究未能进一步解释是怎样影响的。

2.5 其他因素对土壤团聚体稳定性的影响

此外, 其他因素对土壤团聚体的稳定性也有影响。这些因素包括土壤矿质的类型、团聚体的类型以及土壤肥力。团聚体的大小不同对土壤团聚体的稳定性也有较大的影响, 小团聚体较大团聚体氮、磷、钾的含量低, 也较其稳定; 含小团聚体较多的土壤结构相对较差, 抵抗侵蚀的能力也较弱。国内最近几年对土壤团聚体和土壤肥力的研究较多, 目前基本上明确了土壤中各级团聚体的作用及其对土壤肥力的影响。随着土壤肥力水平的提高, 大于 10 μm 微团聚体含量增加, 增加幅度为 2% ~ 5%; 土壤团聚度增大, 增大范围为 2% ~ 8%。土壤团粒的含量与稳定性与土壤肥力呈显著正相关。关连珠、张伯泉等^[10] (1991) 等在此方面作了研究。

3 土壤团聚体研究方法进展

土壤结构侵蚀是水侵蚀的初始阶段和前期形式。结构侵蚀是指微观水流作用下土壤团聚体间的连接以及土壤团聚体本身遭受破坏, 土壤侵蚀而产生的土壤侵蚀过程。土壤是农业生产的基础。土壤团聚体特别是水稳性团聚体在土壤侵蚀和农业中影响很大。土壤团聚作用中有机胶体与黏粒的相互复合是一个复杂的物理化学过程。黏粒表面如形成不溶于水的有机胶膜, 并通过胶膜黏结土粒。土壤团聚体的研究包括土壤团聚体稳定性的研究、稳定性影响因子的研究以及土壤团聚体的形成与破坏机制研究。目前土壤团聚体的研究主要有以下三种方法。

3.1 湿筛法和干筛法

湿筛法是 1936 年约德 (Yoder) 提出来的。伊万诺夫 (Ivanov, 1985)、陆兆熊 (1979)、布莱安 (1974)、雅马莫塔 (Yamamoto) 和安德逊 (1973) 等研究都用湿筛法来评价土壤团聚体的稳定性。干筛法一般不单独使用, 常常与湿筛法结合起来应用。土壤团聚体稳定性愈好, 土水流冲蚀引起的土壤团聚体的分离

也愈少。湿筛法研究结果显示土壤团聚体与土壤侵蚀之间存在很强的负相关。湿筛法在目前土壤团聚体研究中应用最广泛。但是湿筛法时也存在一些问题,如土壤团聚体过筛时易受到破坏以及前期处理土样时不破坏土壤团聚体结构很难掌握等。

3.2 水滴法

[法理斯(Farrs)和波义森(Bousen),1985]、[弗兰西斯(Francis)和克鲁斯(Cruse),1983]、[伯格玛(Bergsma)和瓦伦祖拉(Valenzuela),1981]等提出应利用水滴装置来进行土壤团聚体稳定性的研究。美国 WEEP 方程也提出用水滴法测定土壤团聚体的指标作为土壤抗蚀性的评价因子。罗顿(Rhoton)等(1983)也提出了这种方法,并指出在野外当径流搬运团聚体时,团聚体很少被分离破坏。水滴法研究也显示土壤团聚体与土壤侵蚀之间存在很强的负相关。目前这种方法应用较少。

3.3 土壤微形态法

土壤微形态法是应用偏光电镜或扫描电镜等显微镜法来代替肉眼研究土壤团聚体的方法。即运用偏光电镜等技术手段研究土壤团聚体在不同处理条件下的垒结状况、孔隙度等的变化,揭示侵蚀条件下土壤团聚体的破坏状况。土壤微形态目前在土壤发生分类等领域得到广泛应用,但是在土壤侵蚀研究中应用还较少。仅柯伊斯特拉(M. J. Kooistra)和西德鲁斯(W. Siderius)和蔡强国^[42]等很少一部分人应用电镜研究土壤结皮的微形态,在土壤团聚体破坏机制研究中目前尚未利用。整体来说,土壤微形态在土壤侵蚀研究中的应用尚处于起步阶段。

4 土壤团聚体破坏机制的研究

在解释土壤面蚀和溅蚀中,许多研究者发现土壤中水稳性团聚体(WSA)的百分含量是最重要的土壤性质,与土壤可蚀性密切相关。在土壤侵蚀中结皮的形成是地表产流和发生侵蚀的前奏。国内外的许多学者如 McIntyre(1958)、M. J. Kooistra 和江忠善^[25](1991)等对土壤结皮进行了研究,发现土壤团聚体的破坏和分散是土壤结皮形成的前奏,如加强土壤团聚体的稳定性则可减缓地表产流和侵蚀。因此,土壤团聚体形成和破坏机制的研究成为

土壤科学研究的热点。但由于土壤团聚作用中有有机胶体与黏粒的相互复合是一个复杂的物理化学过程,因而研究团聚体形成和破坏机制的研究成为土壤科学研究的难点。土壤团聚体破坏机制有两种假说:团聚体“气爆”和“水爆”,但到底是哪一种破坏机制尚不太清楚。仅在1972年 Stroosnyder, L 和 P. Koorevaar^[26]研究了土壤团聚体快速湿润而导致土壤团聚体“爆裂”的问题,提出了是土壤团聚体是“气爆”的假说,但这还需要进一步的验证。

5 存在问题及发展趋势

目前,不少国内外的学者在研究土壤抗蚀性时发现土壤团聚体(特别是水稳性团聚体)对土壤侵蚀影响很大,土壤水稳性团聚体的数量和稳定性是制约土壤抗蚀性和抗冲性十分重要的因子。对土壤团聚体的研究,国内进行的较少,并主要是对影响团聚体稳定性的因子与土壤团聚体稳定性的关系进行了一些定性研究,研究的还不够深入;国外对土壤团聚体结构形成与破坏机制的研究50~60年代较多,但侧重于研究雨滴打击能量、有机质种类与含量及耕作措施等对土壤团聚体水稳定性的影响。土壤侵蚀研究的进一步发展客观上要求寻找一个新的切入点,采取多学科交叉在更深的层次上去研究。到今天为止,由于土壤胶结物质种类繁多,影响土壤颗粒的团聚和排列的因素也很复杂,对土壤团粒的破坏机制问题的探讨研究很少。目前国外一些学者提出利用土壤微形态学的基本原理和方法来研究土壤侵蚀过程微观变化,但相关的研究报告尚未见到,在土壤团聚体方面还没有涉及到土壤团聚体破坏机制的研究。综上所述,既然土壤团聚体的破坏对土壤侵蚀影响这么大,并且已有不少专家用土壤水稳性团聚体作为表征土壤抗蚀性抗冲性的因子,而目前土壤团聚体破坏机制的研究还很少见报导,因此,研究土壤团聚体到底是怎么破坏的也就显得特别迫切。并且土壤抗蚀性研究进一步发展客观上也要求弄清侵蚀条件下土壤团聚体破坏的机制,以便能更进一步的揭示土壤抗蚀性的机理,寻求提高土壤抗蚀性的途径。

参考文献:

- [1] Emerson, W. W. A classification of soil aggregates based on their coherence in water[J]. Aust. J. Soil Res. 1967, (5): 47-57.
- [2] Edwards, A. P. and Bremers, J. M. Microaggregate in soils[J]. J. Soil Sci, 33: 141-163.
- [3] Greenland D. J. Mechanism of interaction between clays and defined organic compounds[J]. Soil Fert: 1961, 28: 415-

425.

- [4] M. V. Cheshire. Nature and origin of carbohydrates in soil[M]. London: Academic Press Inc., 1979.
- [5] M. Ben- Hur 等. 多糖、黏粒分散和冲击能对土壤水分入渗的影响. 水保科技情报译自 SSSAJ, 1989, 53, 233- 238.
- [6] Tisdall, J. M. and Oades, J. M. Organic matter and water stable aggregates in soils[J]. J. Soil Sci., 1982, 31, 141- 163.
- [7] 魏朝富, 高明等. 有机肥对紫色水稻土水稳性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114- 116.
- [8] 章明奎, 何振力, 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, 11, 34(4): 359- 365.
- [9] 姚贤良, 于德芳. 有机肥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.
- [10] 关连珠, 张伯泉, 等. 不同肥力黑土、棕壤微团聚体的组成及其胶结物质研究[J]. 土壤学报, 1991, 8, 28(3): 260- 266.
- [11] 魏朝富, 谢德体, 陈世正. 紫色水稻土有机无机复合与土壤团聚的关系[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 70- 76.
- [12] Martin, Griffiths, 等. 绿肥对温带土壤物理性质的影响[J]. 方明译自 "Advance in Soil Science", 1995, 13(1): 72- 90.
- [13] Allison and Jone. 1965, 转引自尹瑞玲 "微生物与土壤团聚体", 土壤, 1987, 24- 29.
- [14] 郝余祥, 程丽娟. 不同粒径土壤团聚体的微生物组成[J]. 土壤, 1979, 31- 35.
- [15] Birgitte Neergaardhe and Leif Petersen. Influence of arbuscular mycorrhizal fungionsoil structure and aggregate stability of vertisol[J]. Plant and Soil 2000, 218, 173- 183.
- [16] J. M. Tisdal. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soil[J]. Soil Science, 1993, 159, 115- 121.
- [17] Tisdall, J. M., Smith, S. E. and Rengasamy P. Aggregation of soil by fungal hyphae[J]. Aust. J. Soil Sci., 1997, 35: 55- 60.
- [18] Chenu. C and J. Guerif. Mechanical strength of clay mineral as influenced by an alospted polysuchride[J]. SSSAJ 1989 54: 1 076- 1 080.
- [19] R. G. Donald and B. D. Kay. The effects of soil aggregate size on early shoot and root growth of marize[J]. Plant and Soil, 1987, 103: 251- 259.
- [20] Morra and M. J., Singer. Crust formation effects on soil erosion process[J]. SSSAJ. 1990, 54: 117- 123.
- [21] J. S. C. Mbagwu. Effects of incultation with organic substrates on the stability of soil aggregate to water[J]. Pedlogie, 1989, 39: 159- 163.
- [22] S. F. Wright, J. L. Starf and I. C. Paltineanu. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage transition[J]. SSSAJ, 1999, 63, 1 825- 1 829.
- [23] 李映强, 曾觉廷, 等. 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.
- [24] 蔡强国, 吴淑安, 陈浩, 等. 坡耕地表土结皮对降雨径流和侵蚀产沙过程的影响[A]. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律论文集[C]. 1990, 48- 56.
- [25] 江忠善, 刘志, 雨滴打击作用对黄土结皮影响的研究[J]. 水土保持通报, 1988, (1).
- [26] Stroosnyder, L and P. Koorevaar. Air pressure within soil aggregates during quick wetting and subsequent "explosion" [J]. Meded. Dak. Laudbou, Rijisuniv, Gent. 1976, 37: 1 095- 1 106.

(上接第 72 页)

(1) 如何消除生成的坡度图中相对较高比例的琐碎图元。

(2) 生成的坡度图图元形状与实际土地利用图元不易套合, 因而在叠加分析时更容易产生细碎图元, 在空间分析中能否使用俘获的技术方法来消除边角。

参考文献:

- [1] 中国地质大学信息工程学院. 武汉华地图形数据公司. MAPCAD&MAPGIS 地理信息系统参考手册[S]. 武汉: 1999(7).
- [2] 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 12.
- [3] 张超, 陈丙咸, 邬伦. 地理信息系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995. 10.
- [4] Ding Y, Fotheringham AS. The integration of spatial analysis and GIS[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1992, 16: 3- 19.
- [5] 张奠坤, 杨凯元. 地图学[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1986.
- [6] 齐清文, 潘安敏. 智能化制图综合在 GIS 环境下的实现方法研究[J]. 地理科学进展, 1998, 17(2): 16- 22.