植物学通报 2000，17 (2)：127～132
Chinese Bulletin of Botany

豆科植物凝集素及其对根瘤菌的识别作用①

王逸群 荆玉祥
（中国科学院植物研究所 北京 100093）

摘要 本文讨论了豆科植物凝集素的性质、分布、基因及其表达 近年来研究表明识别根瘤菌的因子是豆科植物根上的凝集素。将一种豆科植物的凝集素基因转化到另一种豆科植物后，再接种前一种豆科植物的根瘤菌，可以使其被侵染和结瘤。由此人们提出了扩大根瘤菌宿主范围到非豆科植物，特别是粮食作物范围的可能性。

关键词 凝集素，识别，宿主，共生

Legume Lectins and Their Role in the Recognition of Rhizobial Bacteria in Symbiosis Between Legume Plants and Rhizobia

WANG Yi-Qun JING Yu-Xiang
(*Institute of Botany*, *The Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100093)

Abstract This paper reviews the properties, distribution of legume lectins, their genes and expression. In recent years, molecular interaction between host legume plants and rhizobial bacteria implies that the factor of recognizing rhizobia is the lectin on the roots of host plants. After the lectin gene is transferred from one type of legume into another, the latter could be finally infected and nodulated by the rhizobial bacteria that originally only harbor in the former legume. From this fact, crop scientists point out the possibility that the rhizobial bacteria might be extended into non-legume host plants, especially cereal plants for their symbiosis.

Key words Lectin, Recognition, Host, Symbiosis

凝集素(lectin)是一种糖蛋白，在动、植物体内广泛存在。迄今为止，已发现了 1000 多种植物凝集素，其中豆科植物的凝集素有 600 多种(Sharon 和 Lis，1990)。1888 年 Hermann Stillmark 首次发现了蓖麻子凝集素，并对红血球有凝集作用。不久在相思豆中也发现了凝集素。1936 年发现凝集素专一性地结合糖的性质(Summer 和 Howell，1936)。1960 年，Nowell 报道了植物血细胞凝集素(PHA)有促进细胞有丝分裂的作用(Nowell 等，1960)。1975 年，Becker(1975)等研究了刀豆凝集素分子的三级结构，揭开了研究豆科植物凝集素分子空间结构的序幕。近数十年来，人们对凝集素的性质、生理功能、基因结构与表达等方面进行了深入的研究，取得了有意义的进展。凝集素是一种非免疫起源的、非酶的糖蛋白，至少拥有两个与糖结合位点，而且结合是可逆的。凝集素对糖、糖脂、多糖也有高度亲和性并能专一性地结合。

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t99-035

① 收稿日期：1999-03-17 接受日期：1999-05-27 责任编辑：姜联合

1 豆科植物凝集素结合糖和金属离子

1.1 豆科植物凝集素

豆科植物的凝集素在成熟种子中占蛋白质总含量的 10% 左右(Rüdiger 等,1988)。它由 2 个或 4 个单体组成,每个单体的分子量为 25 ~ 30 kD,有一个结合糖位点(Etzler 等,1985;Sharon 等,1990;Van Driessche 等,1988)。凝集素结合二价金属离子 Ca^{2+} 和 Mn^{2+},它们对于凝集素结合糖的活性是必需的,而且按一定的顺序结合。先结合 Mn^{2+} 离子,然后其它结合位点结合 Ca^{2+}。这两种结合必须是结合位点处于最优化的构象状态(Becker 等,1991)。由于豆科植物凝集素一级结构的高度同源,因此其三级结构也非常相似。对于每个单体来讲,反向平行的 β-折叠在数量上占优势地位,但缺少 α-螺旋。除了有结合糖的位点外,凝集素还有一个疏水腔,高度保守(Reeke 等,1988)。

1.2 豆科植物凝集素的分子结构

豆科植物凝集素至少有一个非催化结构域,并可逆地结合到特异单糖或寡糖上。结构域的数量由凝集素的复合体数目来决定。二体或多体凝集素可以形成多种结构的蛋白-糖复合体。单体凝集素不能形成这种复合结构(Ron 等,1992)。

通过豆科植物凝集素晶体结构的分析,发现凝集素与糖形成的复合体,每个单体结合着 Ca^{2+} 和 Mn^{2+},与其中四个高度保守的氨基酸残基直接相互作用。豌豆种子凝集素(PSL)专一性地结合葡萄糖和甘露糖。与 Ca^{2+} 结合时,作用的氨基酸残基是 Asp-121、Asn-125、Phe-123、Asp-129。与 Mn^{2+} 结合,其作用的氨基酸残基是 Glu-119、Asp-121、Asp-129、His-136。凝集素单体与糖结合时,氨基酸残基与糖分子中的氧原子相互作用。在 PSL 中,Asn-125 的侧链与甘露糖分子的 O-4 作用,并直接与 Ca^{2+} 结合。Asp-81 的侧链与甘露糖分子 OH-4 和 OH-6 作用,并通过水分子间接与 Ca^{2+} 相结合。Gly-99、Gly-216 分别与甘露糖分子 O-4、O-6 通过范德华力相互作用。Ala-217 和 Glu-218 与甘露糖以配位键结合,Gly-216 与 Glu-218 之间在空间结构上环的位置发生了改变,移向甘露糖分子。这种改变的最终结果使糖与凝集素之间的氢键作用达到最大。这个环对专一性地结合糖起决定性的作用(Rini 等,1993)。

由此可知,豆科植物凝集素结合单糖位点的氨基酸残基是 Asp-81、Gly-99、Asn-125、Gly-216、Ala-217、Glu-218,它们结合单糖的位点对于结合糖来讲都是必需的。

2 豆科植物凝集素基因及其表达

随着凝集素研究的不断深入,已经分离纯化 70 多种豆科植物的凝集素,其中对大约 40 多种凝集素的基因进行了序列分析(Sharon 等,1990)。氨基酸序列分析表明:有高度的同源性。

2.1 豌豆凝集素基因的结构与表达

Kaminski 等(1987)和 Gatehouse 等(1987)发表了豌豆凝集素基因序列。在 -65 bp 处,有 TATA 框。在该框与起始密码子之间有 22 bp 的重复区域(TATAAAG 和 TGCA 各两次重复)。菜豆属的凝集素基因中也有这样的重复。该基因单拷贝,不含内含子,有 832 bp。体内脉冲标记和体外 mRNA 翻译都清楚地表明它的初始产物是一个大的前体蛋白,长

275 个氨基酸，随后裂解产生成熟的 α 和 β 亚基（Gatehouse 等，1987；Kaminski 等，1987）。刘春明等（1995）对豌豆凝集素基因进行了克隆及序列分析，与报道的已知序列相比，其核苷酸序列和推测的氨基酸序列的同源率分别为 99.6%和 98.9%。

豌豆凝集素基因编码的蛋白质是 $\alpha_2\beta_2$，分子量为 49 kD。β-亚基为 17 kD，α-亚基为 5.8 kD。在阅读框中位于位置 1 和 245 氨基酸之间缺少终止密码子，从而确定 α 和 β 亚基是由翻译后裂解产生的。由 β-α 方向，PSL 以前体蛋白形式，在内质网中合成。前体蛋白为 28 kD.它们在内质网中进行翻译、修饰，包括去掉 30 个氨基酸的导肽之后，被运送到蛋白体中，进行慢慢加工，产生 α 和 β 亚基。加工中进行第一次裂解，产生 α 亚基前体和 β 亚基前体；第二次裂解是从 β-亚基前体的 COOH 端去掉小的肽段，产生 β-亚基；从 α-亚基前体 COOH 端去掉小的肽段（Ala-Ala-Asp-Ala），产生 α-亚基。豌豆种子的 PSL 亚基结构相同，但它们是电荷分布不均匀的两种同源异型凝集素（PSL_1 和 PSL_2）的混合物（Diaz 等，1990）。α-亚基迁移所产生的差异，以及在酸性同源异型凝集素中赖氨酸含量的轻微减少，使 PSL 产生了有差异的同源异型凝集素。而且，在加工过程中包括去掉在 α-亚基的 COOH 端附近的第 240 位置赖氨酸残基的小的肽产生了 PSL_2。

豌豆根和种子的 PSL 由同一基因编码。豌豆根的凝集素结合葡萄糖和甘露糖，与种子 PSL 的抗体发生免疫交叉反应。对根凝集素进行等电聚焦电泳，又显示与种子 PSL 间的差异。根凝集素与豌豆种子同源异型 PSL_2 是同一种物质。根与种子 PSL 结合糖的专一性相似。豌豆根凝集素基因的表达受发育水平调控。在 4～7 d 的豌豆苗中，4 d 的根凝集素比 7 d 的根凝集素含量多（Díaz 等，1984）。21 d 豌豆苗的根凝集素 mRNA 的量与发育子叶 PSL 的 mRNA 量相比少 4 000 倍。种子中 psl 基因的高效表达是由于该基因有对碱性亮氨酸拉链蛋白（bZIP）高亲和力的启动子（Kijne 等，1997），从而解释了豌豆根或植株的其它部分的凝集素的量在整个生命循环过程中达毫微克数量级。

2.2　豆科植物凝集素的加工及定位

相似的凝集素前体分子经过翻译后的不同修饰、加工所产生的凝集素单体不同。所有豆科植物凝集素首先在内质网上合成单链前体蛋白，之后去掉信号肽。当它转运到高尔基体和蛋白贮存液泡时进行了翻译后修饰、加工。豆科植物的凝集素常以糖蛋白形式存在，含有 10%的糖单元碳水化合物。刀豆凝集素是由 290 个氨基酸残基的前体，经过糖基化作用合成。加工过程中，首先去掉糖基部分，紧接着切除 15 个氨基酸残基的肽段，之后形成两个片段，共价连结起来，形成成熟的多肽。蚕豆凝集素的形成过程是位于其前体蛋白 3/4 处，在分解蛋白的作用下断裂，结果形成了 α 链和 β 链。豌豆凝集素翻译后经过特异的加工步骤产生了两个同源异型的豌豆种子凝集素。二者拥有同样的结合糖特性，它们都是单基因的产物。其它豆科植物中发现的同源异型凝集素并不是单基因的产物，而是经过不同基因翻译后修饰、加工产生。例如，1）二花扁豆的两种相似的凝集素由高度同源性的不同基因编码。由于它们 5′-端区序列的不同，因而基因的表达具有特异性。2）四季豆的两个不同的基因编码四聚体凝集素是由两个不同的单体 PHA-E 和 PHA-L 装配而成。单体 PHA-E 和 PHA-L 各自拥有不同的生物学性质，以及不同的结合糖专一性。

http://www.chinajournal.net.cn

豆科植物种子凝集素定位于子叶的蛋白体和液泡。大豆、二花扁豆、花生、菜豆、刀豆、蚕豆等植物的种子凝集素在种子成熟后期含量迅速达到最高水平。亚细胞结构研究

表明：在豌豆发育的子叶中 PSL 定位于薄壁组织的细胞壁上，在成熟阶段，位于内质网和发育的蛋白体中，成熟种子的 PSL 局限在蛋白体。这种分布可能与蛋白质的贮藏有关。豇豆、菜豆下胚轴的细胞壁上也有少量的凝集素存在。大豆根凝集素位于大豆根表面。菜豆、豌豆根凝集素位于根毛的尖端和皮层细胞(Díaz 等，1986；Gatehouse 和 Boulter，1980；Goldberg 等，1983；Halverson 等，1986)。

3 凝集素在豆科植物-根瘤菌共生中的作用

豆科植物的根可以被根瘤菌感染，能够诱导根形成根瘤，固定空气中的氮，转化为植物的氮素养料。根瘤菌感染对宿主植物有专一性。根据根瘤菌在豆科植物上形成根瘤的专一性，构成了“互接种族”关系。在同一互接种族内的植物可以互相利用其根瘤菌结瘤。(荆玉祥等，1995)。根瘤菌与宿主豆科植物之间建立的特有的共生关系中，凝集素对根瘤菌具有识别作用。

Hamblin 和 Kent(1973)首次报道了根瘤菌与凝集素相互作用。把菜豆根瘤菌的悬浮液加入到菜豆凝集素中，二者发生了凝集作用。于是他们提出了假说：与菜豆凝集素结合的根瘤菌到达菜豆的根，在适当的位点感染植物(Hamblin 等，1973)。Bohlool 和 Schmidt(1974)提出凝集素起到宿主植物专一性决定因子的特殊作用。使大豆结瘤的根瘤菌结合着大豆种子凝集素(SBL)，其它根瘤菌并不结合 SBL。于是他们提出豆科植物的凝集素在豆科植物根表面与适当的根瘤菌表面的特异性多糖产生特异性的相互作用(Bohlool 等，1974)。Dazzo 和 Hubbell(1975)发现了三叶草根表面凝集素能够凝集具有感染能力的根瘤菌，提出了交联桥假说：三叶草凝集素特异性地识别根瘤菌表面的抗原，形成交联桥，从而形成正确的分子界面结构，保证根瘤菌特异性地吸附到三叶草根表面(Dazzo 和 Hubbell，1975a；Dazzo 和 Hubbell，1975b)。Dazzo 等(1985)又提出：三叶草根瘤菌吸附到三叶草根时，以其凝集素作为中介，使三叶草根瘤菌选择性地在三叶草根毛上积累。凝集素在根瘤菌吸附于三叶草根毛尖端的过程中起到了非常重要的作用。根瘤菌的酸性夹膜多糖(EPS/CPS)、脂多糖(LPS)与凝集素产生相互作用(Dazzo 等，1985；Philip-Hollingsworth 等，1989)。Diaz 等(1995)也提出，位于根毛顶端的 PSL2，可以结合适当的配位体。豌豆根瘤菌能够产生几种 PSL 的配位体，如 EPS、LPS、CPS。CPS、LPS 与凝集素的结合和根瘤菌的培养时期有关，在根瘤菌与根毛相互识别中，它们是重要的调控因子(Díaz 等，1995a；Díaz 等，1995b)。Planqué 与 Kijne 在豌豆凝集素试验中，也发现具有感染能力的豌豆根瘤菌具有 CPS 和 LPS(Kijne 等，1997；Planqué 等，1977)。在这些多糖中究竟哪个起关键作用尚无定论。

Lerouge 等(1990)提出，凝集素可以特异性地与根瘤菌 Nod 因子相互作用。豆科植物凝集素有结合糖的位点和疏水性囊，它与根瘤菌的 Nod 因子的寡聚几丁质部分或脂肪酸链产生相互作用(Lerouge 等，1990)。Díaz 等(1989；1995)报道：在豆科植物和根瘤菌共生作用中，宿主植物的凝集素起决定作用。通过发根农杆菌将豌豆凝集素基因转移到白三叶草中，产生了发根。接种豌豆根瘤菌后根毛卷曲。对转基因的三叶草根进行免疫细胞学定位试验，表明 PSL 存在于正在发育的根毛顶端(Díaz 等，1989；1995a；1995b)。Díaz 等(1995；1996)又进一步研究了在转 psl 基因的白三叶草和红三叶草中 PSL2 的作用，指出豌

http://www.plantscience.ac.cn

豆凝集素是根瘤菌的识别受体，因凝集素基因的转化而扩大了豌豆根瘤菌的宿主范围。转凝集素基因植株的根对于外源根瘤菌的几丁质脂寡糖信号分子的反应增强从而产生瘤状物或结瘤。（Díaz 等，1996；1995a；1995b；Wycoff 等，1997）。

4　通过凝集素基因扩大根瘤菌宿主范围的可能性

豆科植物根的凝集素是宿主植物对根瘤菌的重要识别因子。转豌豆凝集素基因的三叶草，在感染豌豆根瘤菌（*R. leguminosarum* v. *viciae*）后结瘤，甚至固氮作用还有提高，说明引入豌豆凝集素基因可以去除豌豆根瘤菌对宿主专一性的屏障。与此相似，Hirsch 等（1995）将大豆凝集素基因 Le1 转入百脉根（*Lotus*），在用大豆根瘤菌感染百脉根，使其出现结瘤反应，包括根毛卷曲、皮层细胞分裂（Hirsch 等，1995）。Edwards 等（1991）和 Höfte 等（1991）分别将豌豆凝集素转入到马铃薯、烟草中，研究了凝集素在转基因植株中的细胞生物学定位及其表达。

作者实验室进行了豆科植物凝集素基因和植物血红蛋白基因双价基因的植物表达载体的构建，并分别转化到烟草和水稻，获得了转基因植物。现在正在对基因及其表达进行检测。如果转基因植物能识别根瘤菌等方面有所突破，在理论和实践上具有重要的意义。

参　考　文　献

刘春明，于占洋，朱祯，周兆谰，肖桂芳，李向辉，1995. 豌豆外源凝集素基因的克隆及序列分析，遗传学报，**22**(4)：302～306

荆玉祥，匡廷云，李德葆主编，1995. 植物分子生物学-成就与前景，北京：科学出版社，第 180～190 页

Becker J W, Reeke G N, Wang J L, Cunningham B A, Edelman G M, 1975. The covalent and three-dimensional structure of concanavalin A. *J Biol Chem*, **250**: 1513～1524

Becker J W, Reeke G N Jr, 1991. Specific carbohydrate binding by concanavalin A and favin. *Trans Amer Cryst Assoc*, **25**: 37～90

Bohlool B B, Schmidt E L, 1974. A possible basis for specificity in Rhizobium-legume root nodule symbiosis. *Science*, **185**: 269～271

Dazzo F B, Hubbell D H, 1975a. Cross-reactive antigens and lectin as determinants of symbiotic specificity in the Rhizobium-clover association. *Appl Microbiol*, **30**: 1017～1033

Dazzo F B, Hubbell D H, 1975b. Concanavalin A: lack of correlation between binding to Rhizobium and specificity in the Rhizobium-legume symbiosis. *Plant soil*, **43**: 713～717

Dazzo F B, Hollingsworth R I, Sherwood J E, Abe M, Hrabak E, Gardiol A, Pankratz H S, Smith K, Yang H, 1985. Recognition and infection of clover root hairs by *Rhizobium trifolii*. In: Evans H J, Bottomley P J, Newton W E eds. Nitrogen fixation research progress. Martinus Nijhoff Pub. B.V., Dordrecht, The Netherlands, pp 239～245

Dazzo F B, 1981. Bacterial attachment as related to cellular recognition in the Rhizobium-legume symbiosis. *J Supramol Struct. Cell Biochem*, **16**: 29～41

Dazzo F B, Truchet G L, 1983. Interactions of lectins and their saccharide receptors in the Rhizobium-legume symbiosis. *J Membrane Biol*, **73**: 1～16

Díaz C L, Van Spronsen P C, Bakhuizen R, Logman G J J, Lugtenberg E J J, Kijne J W, 1986. Correlation between infection by Rhizobium leguminosarum and lectin on surface of *Pisum sativum* L roots. *Planta*, **168**: 350～359

Díaz C L, Lems-van Kan P, Van der Schaal I A M, Kijne J W, 1984. Determination of pea (*Pisum sativum* L.) root lectin using an enzyme-linked immunoassay. *Planta*, **161**: 302～307

Díaz C L, Melchers L S, Hooykaas P J J, Lugtenberg E J J, Kijne J W, 1989. Root lectin as a determinant of host-plant specificity in the Rhizobium-legume symbiosis. *Nature*, **338**: 579～581

Díaz C L, Hosselet M, Logman G J J, van Driessche E, Lugtenberg B J J, Kijne J W, 1990. Distribution of glucose/mannose-specific isolectins in pea (*Pisum sativum* L.). *Planta*, **181**: 451～461

Díaz C L, 1996. Sugar signals and legume lectins. In: Stacey G, Mullin B, Gresshoff P M eds, Biology of Plant-Microbe Interactions. ISMPMI, St. Paul, MN, pp 399～402

https://www.sciengine.com/doi/10.3724/CBB-t99-035

Díaz C L, Logman T J J, Stam H C, Kijne J W, 1995a. Sugar-binding activity of pea lectin expressed in white clover hairy roots. *Plant Physiology*, **109**: 1167～1177

Díaz C L, Spaink H P, Wijffelman C A, Kijne J W, 1995b. Genomic requirements of Rhizobium for nodulation of white hairy roots

transformed with the peak lectin gene. *MPMI*, **8**: 348 ~ 356

Edwards G A, Hepher A, Clerk S P, Boulter D, 1991. Pea lectin is correctly processed, stable, and active in leaves of transgenic potato plants. *Plant Mol Biol*, **17**: 89 ~ 100

Etzler M E, 1985. Plant lectins: molecular and biological aspects. *Ann Rev Plant Physiol*, **36**: 209 ~ 234

Gatehouse J A, Bown D, Evans I M, Gatehouse L N, Jobes D, Preston P, Croy R R D, 1987. Sequence of the seed lectin gene from pea (*Pisum sativum* L.). *Nucl Acid Res*, **15**: 7642

Gatehouse J A, Boulter D, 1980. Isolation and properties of a lectin from the roots of *Pisum sativum* (garden pea). *Physiol Plant*, **49**: 437 ~ 442

Goldberg R B, Hoschek G, Vodkin L O, 1983. An insertion sequence blocks the expression of a soybean lectin gene. *Cell*, **33**: 465 ~ 475

Halverson L J, Stacey G, 1986. Signal exchange in plant microbe intractions. *Microbiol Rev*, **50**: 193 ~ 225

Hamblin J, Kent S P, 1973. Carbohydrate-binding sites in plant lectins. *Nature New Biol*, **245**: 28 ~ 30

Hirsch A M, Brill L M, Lim P O, Scambray J, Van Rhijn P, 1995. Steps toward defining the role of lectins in nodule development in legumes symbiosis. *Symbiosis*, **19**: 155 ~ 173

Höfte H, Faye L, Dickinson C, Herman E M, Chrispeels M J, 1991. The protein-body proteins phytohemagglutinin and tonoplast intrinsic protein are targeted to vacuoles in leaves of transgenic tobacco. *Planta*, **184**: 431 ~ 437

Kaminski P A, Buffard D, Strosberg A D, 1987. The pea lectin gene family contains only one functional gene. *Plant Mol Biol*, **9**: 497 ~ 507

Kijne J W, Bauchrowitz M A, Diaz, 1997. Root lectins and Rhizobia. *Plant Physiol*, **115**: 869 ~ 873

Lerouge P, Roche P, Faucher C, Maillet F, Truchet G, Prome J C, Denarie J, 1990. Symbiotic host-specificity of Rhizobium meliloti is determined by a sulfated and acetylated glucosamine oligosaccharide signal. *Nature*, **344**: 781 ~ 784

Nowell P C, 1960. Phytohemagglutinin: An initiator of mitosis in cultures of normal human leucocytes. *Cancer Res*, **20**: 462 ~ 466

Planqué K, Kijne J W, 1977. Binding of pea lectin to a glycan type polysaccharide in the cell wall of Rhizobium leguminosarum. *FEBS Letters*, **73**: 64 ~ 66

Philip-Hollingsworth S, Hollingsworth R I, Dazzo F B, Djordjevic M A, Rolfe B G, 1989. The effect of interspecies transfer of Rhizobium host-specific nodulation genes on acidic polysaccharide structure and in situ binding by host lectin. *J Biol Chem*, **264**: 5710 ~ 5714

Reeke G N Jr, 1988. Possible role of phytohemagglutinin in *Phaseolus vulgaris* L. *Curr Top Microbiol Immunol*, **139**: 35 ~ 58

Rini J M, Hardman K D, Einspahr H, Suddath F L, Carver J, 1993. X-ray crystal structure of a pea lectin-trimannoside complex at 2.6A resolution. *J Biol Chem*, **268**: 10126 ~ 10132

Ron R, van Eijsden, Flip J, Hoedemaeker, Diaz C L, Lugtenberg B J J, Pater B S D, Kijne J W, 1992. Mutational Analysis of pea lectin replacement of Asn 125 by Asp in the monosaccharide binding site eliminates mannose/glucose binding activity. *Plant Molacular Biology*, **20**: 1049 ~ 1058

Rüdiger H, 1988. In: Franz H ed, Advances in lectin research, Vol 1, Berlin: Springer-Verlag, pp 26 ~ 72

Sharon N, Lis H, 1990. Legume lectins-a large family of homologous proteins. *FASEB J*, **4**: 3198 ~ 3208

Summer B, Howell S F, 1936. The identification of the hemagglutinin of the jack bean with concanavalin A. *J Bacteriol*, **32**: 227 ~ 237

Van Driessche E, 1988. Strucure and function of leguminous lectins. In: Advances in lectin research, Vol 1, Berlin: Springer-Verlag, pp 73 ~ 134

Wycoff K L, Van Rhijn P, Hirsch A M, 1997. The ribosomal protein P0 of soybean (*Glycine max* L. Merr.) has antigenic crossreactivity to soybean seed lectin. *Plant mol Biol*, **34**: 295 ~ 306

更 正

本刊 17 卷 1 期 91 页第 11 行‘他与崔□教授……’中的‘□’字，由于在造字环节上失误，误为‘□’字，特此更正，并向作者及读者深表歉意。

engine.com/doi/10.3724/CBB-t99-035

——本刊编辑部