城市土壤压实对土壤水分特征的影响 *
——以南京市为例

杨金玲　张甘霖†　赵玉国　赵文君　何　跃　阮心玲
(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) ,南京　210008)

摘　要　通过对南京市不同土地利用下的土壤容重、孔隙度和土壤水分特征曲线的测定 ,研究了压实对土壤水分特征参数的影响。结果表明城市土壤存在严重的压实退化现象 ,土壤容重和孔隙度能够很好地反映土壤的压实程度。随着压实程度的增加 ,土壤的田间持水量增加 ,萎蔫点含水量增加 ,而土壤的最大有效水含量却明显减少。所以 ,压实土壤对水分的调节能力下降 ,使其上生长的植物更不容易获得水分供应。

关键词　城市土壤 ;压实 ;水分特征
中图分类号　S152　　**文献标识码**　A

许多研究表明 ,在城市里土壤压实普遍存在[1～3]。土壤压实主要是城市建设中的机械压实、人为践踏和雨点打击地面所致。土壤压实会带来一系列的不良后果 ,如结构体破坏和结构体的稳定性变弱[4,5] ,原来的结构体碎片结合 ,结合后的结构体体积增大[4,6] ,自然结构体之间和结构体内部孔隙锐减[4] ,总孔隙度减少[7,8] ,紧实度增加 ,容重增大[9]。压实土壤的入渗率显著降低[10～12] ,表层会遭受侵蚀[10,11]。有研究表明 ,压实土壤的水分含量减少[13] ,而土壤含水量影响土壤中进行的诸多物理、化学与生物生化过程[14,15] ,导致土壤水库库容萎缩[16] ,增加降雨时城市的地表径流 ,导致城市洪峰增大和次数增多[17] ,严重影响城市的生态环境和人们的生活质量。但有关压实对土壤水分特征的影响尚缺乏定量的表达 ,并且很少涉及人为活动频繁、土壤又最有可能被高度压实的城市区域。对城市区域土壤压实状况的系统测定和评价目前相当缺乏 ,因此对压实的可能影响也没有定量的参照。本文以南京市为例 ,选择不同土地利用类型下的土壤 ,研究城市土壤压实对水分特征参数土壤田间持水量、萎蔫点含水量和有效水含量的不同影响 ,为系统评价南京市典型区域土壤的压实现状和可能影响提供必要的指标和参考。

1　材料与方法

研究区域选择在南京市 ,选取不同土地利用类型下的土壤共计 36 个采样点。土地利用类型考虑了不同的功能区类型、植被类型和利用历史的结合。功能区类型主要有城市公园、居民住宅区、道路绿化带、学校绿地、郊区菜地 ;植被类型选择草坪、树下草坪、树下灌木和蔬菜等类型。利用历史有小于 5 a 的新土壤和大于 20 a 的老土壤。因为城市土壤的压实主要在表层[18] ,所以主要采集表层 0～10 cm 的土壤样品和原状环刀。土壤质地为粘壤土、壤土和砂壤土。

分析测定项目主要有 :土壤含水量 :烘干法 ;土壤容重 :环刀法 ;土壤比重 :比重瓶法 ;土壤总孔隙度 :通过公式计算获得 ,土壤总孔隙度 (%) = (1 - 容重/比重) ×100 % ;土壤通气孔隙度 :首先测定土壤毛管水和土壤饱和水 ,二者之差即是土壤重力水 ,由于土壤重力水的比重为 1 g cm^{-3} ,由此可以换算土壤的通气孔隙度 ;土壤毛管孔隙度 :通过计算获得 ,土壤毛管孔隙度 = 总孔隙度 - 通气孔隙度 ;土壤水分特征曲线 :土壤压力板 (膜) 法测定[19,20]。关于土壤孔隙度的测定 ,本文采纳了刘多森的方法[21]。

* 国家自然科学基金重点项目 (40235054) 和中国科学院知识创新工程方向性项目 (KZCX3-SW-427) 资助
† 通讯作者 ,E-mail : glzhang @issas. ac. cn
作者简介 :杨金玲 (1973～) ,女 ,硕士 ,助理研究员 ,主要从事土壤发生和土壤生物地球化学研究。E-mail : jlyang @issas. ac. cn
收稿日期 :2004 - 11 - 23 ;收到修改稿日期 :2005 - 04 - 08

2 结果与讨论

2.1 土壤压实与容重、孔隙度的关系

土壤压实的直接后果是土壤容重增大,孔隙度减小[9]。在同一质地的土壤上,压实越严重,容重越大,孔隙度越小。所以人们一般用容重和孔隙度来反映土壤的压实程度。不同功能区的土壤容重和孔隙度的统计性描述见表 1。从多重比较的结果看,城区土壤与郊区菜地土壤的压实程度在 95 %的水平下差异显著,而城区内各个功能区之间的土壤压实程度差异不显著。

表 1 不同功能区土壤容重和孔隙度

Table 1 Soil bulk densities and total porosities in different function zones

项目 Item		居民区 Residential area	公园 Park	学校 Campus	道路绿化带 Road greenbelt	郊区菜地 Vegetable garden
容重 Bulk density ($g\ cm^{-3}$)	最大值 Max	1.54	1.70	1.49	1.65	1.36
	最小值 Min	1.35	1.28	1.35	1.14	1.25
	平均值 Mean	1.43 a	1.52 a	1.43 ab	1.43 a	1.29 b
	标准差 Stdev	0.72	0.14	0.05	0.19	0.04
总孔隙度 Total porosity (%)	最大值 Max	49.5	51.0	49.0	56.6	53.6
	最小值 Min	43.0	37.9	44.6	39.1	49.7
	平均值 Mean	46.7 a	43.8 a	46.6 a	46.9 a	52.3 b
	标准差 Stdev	2.49	4.45	1.45	6.50	1.38

注:同一行中含有相同字母的为差异不显著($p < 0.05$). Note: The same letter in the same row shows no significance at $p < 0.05$ level

图 1a 显示容重与孔隙度之间具有非常显著的相关性,容重越大,土壤压实越严重,土壤的孔隙度越少。图 1 b 表明毛管孔隙度、通气孔隙度与总孔隙度的关系,前两者与后者间具有极显著的正相关性。说明总孔隙度减少,毛管孔隙度和通气孔隙度都会随之减少。从两条模拟线的斜率可看出,P_n 的斜率大于 P_c 的斜率。这说明土壤压实对通气孔隙度的影响大于对毛管孔隙度的影响,即当土壤被压实时,土壤的通气孔隙更容易减少。研究的 36 个点的平均总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度三者的比例为 13 ∶12 ∶1。从图 1 a 还可以看出,当容重大于 1.60 $g\ cm^{-3}$时,土壤的通气孔隙度已经接近 0。

一般适于植物生长发育的表层土壤容重为 1.1～1.3 $g\ cm^{-3}$,总孔隙度为 50 %～56 %,通气孔隙度在 8 %～10 %,如能达到 15 %～20 %则更好[22]。而南京大部分城区表层土壤容重大大超过植物生长发育所需要的理想值。容重 1.14～1.70 $g\ cm^{-3}$,平均为 1.43 $g\ cm^{-3}$;总孔隙度 37.9 %～56.6 %,平均为 47.0 %;毛管孔隙度 36.5 %～48.0 %,平均为 43.4 %;通气孔隙度为 0.4 %～10.7 %,平均为 3.5 %。从图 2 中可以看出,77.8 %的土壤容重大于 1.3 $g\ cm^{-3}$,其中城区土壤占 92.9 %;75.0 %的土壤总孔隙度小于 50 %,城区土壤占 96.3 %;94.4 %的土壤通气孔隙度小于 10 %,其中城区土壤占 82.4 %。可见,土壤普遍被压实,尤其是城区土壤。

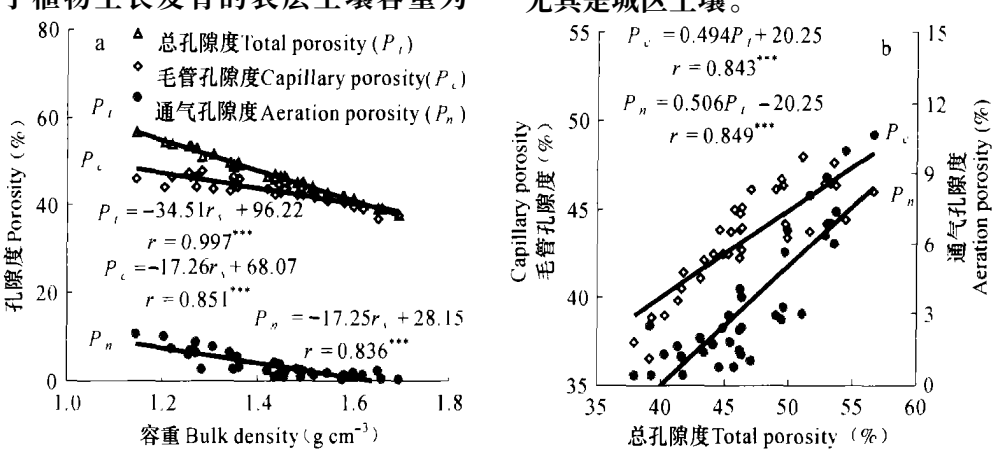

图 1 容重与孔隙度(a)以及不同孔隙度之间(b)的关系

Fig. 1 Relationships between bulk density and soil porosity

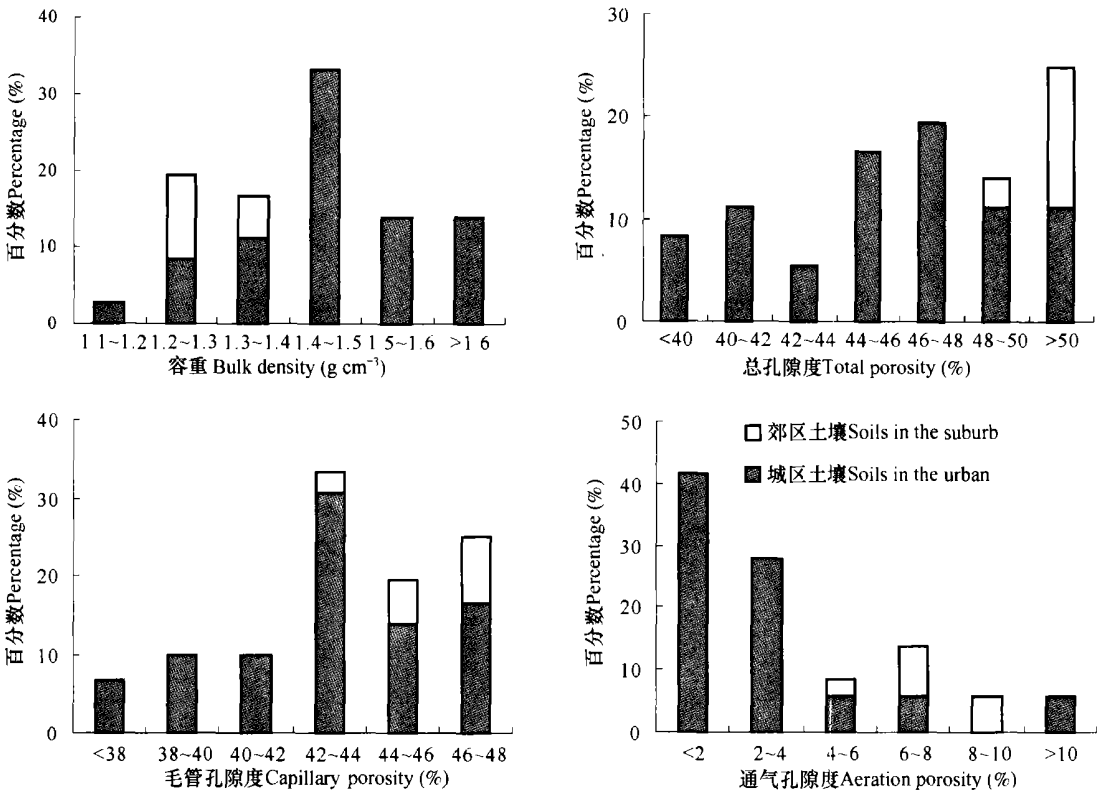

图 2　容重和孔隙度的频率分布图

Fig. 2　Frequency distribution of bulk density and porosity of urban soils

Reisinger 等注意到,容重达到 1.40 g cm^{-3}已经成为根系生长的限制值[23]。Zisa 等的实验研究说明,容重超过 1.60 g cm^{-3}树苗几乎不能成活(1)。在南京市不同土地利用类型上的研究观察到,61.1 %的土壤容重大于 1.40 g cm^{-3},13.9 %的容重大于 1.60 g cm^{-3}。由此可见,南京市土壤的压实是非常严重的,而且大多数土壤的压实已经到了能严重限制植物根系生长、甚至引起死亡的程度。

2.2　土壤田间持水量与压实的关系

田间持水量是指在地下水较深和排水良好的土地上充分灌水或降水后,允许水分充分下渗,并防止蒸发,经过几天时间(2～7 d),土壤剖面所能保持的较稳定的土壤含水量(土水势或土壤水吸力达到一定数值),是土壤所能保持的相对稳定的最高含水量。现在多数人认为田间持水量的吸力范围在 10 kPa～30 kPa 之间[24],也有人认为田间持水量的吸力范围在 10 kPa～60 kPa 之间[25,26],本文用 30 kPa 时含水量表示田间持水量。图 3 是土壤的田间持水量与土壤容重和通气孔隙度的关系。从图中可以看出,土壤田间持水量与容重呈正相关,而与通气孔隙度呈负相关,这说明在一定的压实范围内随着土壤压实程度增加,土壤的田间持水量增加。

2.3　土壤萎蔫点含水量与压实的关系

当土壤含水量降低到萎蔫点时,植物将发生永久萎蔫,这时的土水势一般为 1 500 kPa,称为永久萎蔫点。图 4 显示了土壤萎蔫点含水量与容重和通气孔隙度的关系。从图中可以清楚地看出,土壤容重越大,通气孔隙度越小,土壤的萎蔫点含水量越高。当然其他的物理量对萎蔫点含水量也会有所影响。将萎蔫点含水量与土壤的有机质、粘粒、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度进行逐步回归,其逐步回归方程见表 2。从方程的自变量可以看出,萎蔫点的含水量与土壤容重最相关,土壤容重最先进入方程式,其次是粘粒含量和通气孔隙度。萎蔫点的含水量与容重和粘粒含量正相关,与通气孔隙度负相关。

(1) Zisa R P, Halverson H G, Stout B B. Establishment and Early Growth of Conifers on Compact Soils in Urban Areas. US Department of Agriculture Forest Service, Northesstern Experimental Station Research Paper NE-451. Bromall, Pennsyvania, USA. 1980

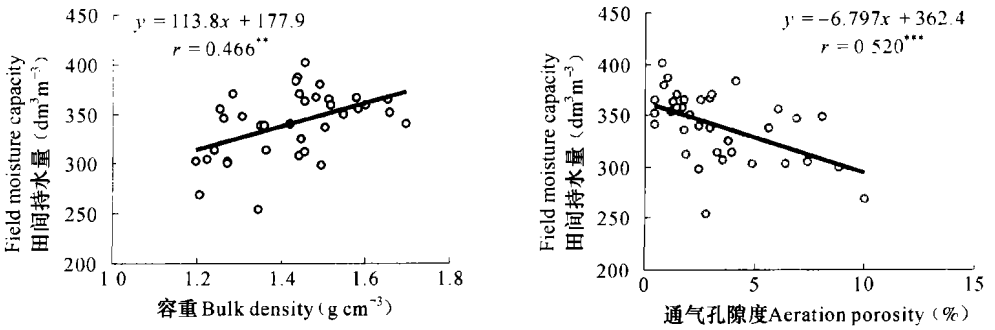

图 3 土壤田间持水量与容重和通气孔隙度的关系

Fig. 3 Relationships between field moisture capacity and bulk density or aeration porosity

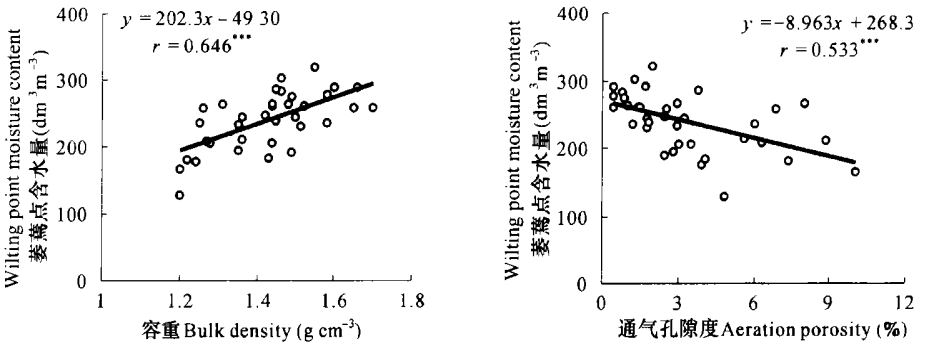

图 4 土壤萎蔫点含水量与容重和通气孔隙度的关系

Fig. 4 Relationships between soil wilting point moisture content and bulk density or aeration porosity

表 2 萎蔫点含水量与其他物理参数的逐步回归方程

Table 2 Stepwise regression equations of the wilting point moisture content and other physical parameters

方程 Equation	相关系数 r
$\theta_w = 202.3 r_s - 49.30$	0.646 ***
$\theta_w = 208.5 r_s + 0.530 C - 134.2$	0.747 ***
$\theta_w = 97.55 r_s + 0.706 C - 7.724 P_n + 23.88$	0.789 ***
$\theta_w = 0.799 C - 12.21 P_n + 164.2$	0.768 ***

注: θ_w:萎蔫点含水量($dm^3 m^{-3}$), r_s:容重($g cm^{-3}$); C:粘粒含量($dm^3 m^{-3}$); P_n:通气孔隙度(%)。 ***, $p < 0.001$,极显著相关;样品数 $n = 36$. Note: θ_w: wilting point moisture content ($dm^3 m^{-3}$); r_s: bulk density ($g cm^{-3}$); C: clay content ($dm^3 m^{-3}$); P_n: aeration porosity; ***, $p < 0.001$; Sample numbers $n = 36$

可见,压实和粘粒含量都能增加土壤萎蔫点的含水量,压实越严重,容重越大,通气孔隙度越小,萎蔫含水量越多,对植物来说,其无效水含量越高。从该研究测定的数据看,城市土壤的萎蔫点含水量显著高于林地土壤 1 500 kPa 时的含水量,甚至是相同质地林地土壤含水量[27]的 3 倍以上。这也是城市树木生长不良和植树成活率低的原因之一。

2.4 土壤最大有效水含量与压实的关系

长期以来,把田间持水量作为有效水量的上限,把永久萎蔫点作为下限。这样,土壤最大有效水的含量公式为:

土壤最大有效水含量(%) = 田间持水量(%) - 萎蔫点含水量(%)

表 3 土壤最大有效水含量与其他物理参数的回归方程

Table 3 Regression equations of the maximum available water content and some physical parameters

方程 Equation	相关系数 r
$\theta_y = 1.096 O - 0.246 C - 19.93 r_s + 140.4$	0.511 **
$\theta_y = 1.137 O - 0.246 C + 0.475 P_t + 88.77$	0.510 **
$\theta_y = 1.163 O - 0.230 C + 0.671 P_c + 78.79$	0.510 **
$\theta_y = 1.248 O - 0.237 C + 0.288 P_n + 106.3$	0.509 **

注: θ_y:最大有效水含量($dm^3 m^{-3}$); O:有机质含量($g kg^{-1}$); r_s:容重($g cm^{-3}$); C:粘粒含量($dm^3 m^{-3}$); P_t:总孔隙度(%); P_c:毛管孔隙度(%); P_n:通气孔隙度(%); **, $p < 0.01$,极显著相关;样品数 $n = 36$. Note: θ_y: available water content ($dm^3 m^{-3}$); O: organic matter content ($g kg^{-1}$); r_s: bulk density ($g cm^{-3}$); C: clay content ($dm^3 m^{-3}$); P_t: total porosity (%); P_c: capillary porosity (%); P_n: aeration porosity; **, $p < 0.01$; Sample numbers $n = 36$

有研究表明,土壤的有机质含量和粘粒对土壤水分扩散有重要的影响[22,28],因而在讨论土壤有效水含量时必须要考虑土壤有机质和粘粒含量。表 3 是土壤最大有效水含量与其他物理参数的回归方

程。从表中可以看出,影响土壤最大有效水含量的因素有土壤有机质含量、粘粒含量、容重和孔隙度。从方程的系数看,土壤最大有效水含量与有机质、孔隙度呈正相关,与粘粒、容重呈负相关。即容重越大,孔隙度越少,土壤的最大有效水含量越少,以致城市土壤对植物的水分补偿能力较差。

通过以上分析可知:压实虽然会增加土壤的田间持水量,但却会使土壤最大有效水含量减少,这主要是因为压实更大程度地增加了土壤无效水(萎蔫点)的含量。图 5 是土壤田间持水量与萎蔫点含水量的关系。从模拟的方程可以看出,田间持水量与萎蔫点含水量之间有极显著的正相关关系,这与贾宏涛等在[illegible]土上的研究结论[29]是一致的。我们所研究区域的土壤平均田间持水量:平均最大有效水含量:平均萎蔫点含水量 = 1 ∶0.3 ∶0.7,这也进一步说明在城市土壤的田间持水量中大部分为无效水。

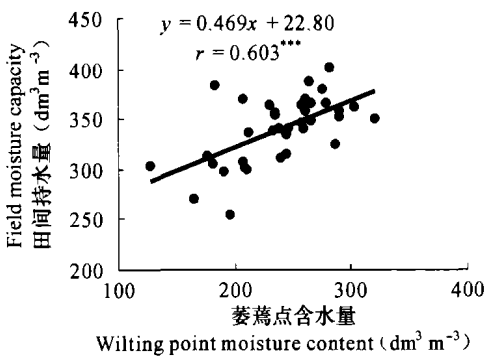

图 5　土壤田间持水量与萎蔫点含水量的关系

Fig. 5　Relationship between field moisture capacity and wilting point moisture content

压实不仅会增强土壤的穿透性阻力,使根系难以向四周扩展,也使得土壤最大有效水含量降低,在天气干旱时,更容易使植物缺水,影响其正常生长。因而,对于城市土壤持水性的评价,不宜简单地应用田间持水量或者某一土壤吸力下的含水量来表示,而应以土壤有效水含量或某一吸力段的含水量差(或实效孔径的孔度)对土壤持水性进行评价。土壤最大有效水含量的减少使得土壤储存水分的能力下降,土壤对水分的调节能力也下降,不耐干旱。这不仅对土壤中的其他物理化学过程产生不利的影响,而且对其上生长的植物极为不利,这无疑不利于良好的城市生态环境建设。

3　结　论

城市土壤存在严重的压实退化现象,土壤容重和孔隙度能够很好地反映土壤的压实程度。随着土壤压实程度的增加,土壤的田间持水量增加,萎蔫点含水量增加,而土壤的有效水含量却明显减少。所以,压实土壤对水分的调节能力下降,使其上生长的植物更容易遭受干旱的威胁。

参 考 文 献

[1] Bullock P, Gregory P. Soils in the Urban Environment. Oxford, Great Britain: Blackwell Scientific Publications, 1991

[2] Jim C Y. Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical & subtropical urban habitates. Environmental Conservation, 1993, 20 (1): 35～49

[3] 管东生,何坤志,陈玉娟. 广州城市绿地土壤特征及其对树木生长的影响. 环境科学研究, 1998, 11 (4): 51～54. Guan D S, He K Z, Chen Y J. The soil characteristic of Guangzhou urban vegetation and its effects on tree growth (In Chinese). Research of Environmental Sciences, 1998, 11 (4): 51～54

[4] Jim C Y. Experimental study of soil microfabrics induced by anisotropic stresses of confined swelling and shrinking. Geoderma, 1986, 37: 91～112

[5] Jim C Y. Stress, shear deformation and micromorphological clay orientation: a synthesis of various concepts. Catena, 1990, 17 (4/5): 431～447

[6] Shoba S A, Sokolov L A. Changes in the microfabric of sod-podzolic soils in recreational load zones. Soviet Soil Science, 1982, 14 (3): 85～91

[7] Patterson J C. Soil compaction —Effects on urban vegetation. Journal of Arboriculture, 1977, 3: 161～167

[8] Short J R, Patterson J C. Urban soils of the Mall in Washington, DC. Park Science, 1984, 5 (1): 3～5

[9] 卢瑛,龚子同,张甘霖. 南京城市土壤特性及其分类的初步研究. 土壤, 2001, 33 (1): 47～51. Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. Features and classification of urban soils in Nanjing (In Chinese). Soils, 2001, 33 (1): 47～51

[10] Lutz H J. Soil conditions on picnic grounds in public forest parks. Journal of Forestry, 1945, 43: 121～127

[11] Brown J H, Kalisz Jr S P, Wright W R. Effects of recreational use on forested sites. Environmental Geology, 1977, 1: 425～431

[12] Monti P W, Mackintosh E E. Effect of camping on surface soil properties in the boreal forest region of northwestern Ontario, Canada. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43: 1 024～1 029

[13] Dawson J O, Countryman D W, Fittin R R. Soil and vegetation patterns northeastern Iowa campgrounds. Journal of Soil and Water Conservation, 1978, 33: 39～41

[14] Gifford R M. Interaction of carbon dioxide with growth-limiting environmental factors in vegetation productivity: Implications for the global carbon cycle. Adv. Bioclimatol, 1992, 1: 24～58

[15] Neve S D, Hofman G. Quantifying soil water effects on nitrogen mineralization from soil organic matter and from fresh crop residues. Biol. Fertil. Soils, 2002, 35: 379～386

[16] Shi X Z, Liang Y, Yu D S, *et al*. Functional rehabilitation of the

"soil reservoir" in degraded soils to control floods in the Yangtze River Watershed. Pedosphere, 2004, 14(1):1～8

[17] Zhang G L, Gong Z T, Zhao W J, *et al*. Features of soils in urban and suburban Nanjing and their environmental effect. *In*: Burghardt W, Dornauf C. First International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas. Essen, Germany: University of Essen, 2000. 39～44

[18] LaPage W F. Recreation and forest site. Journal of Forestry, 1962, 60: 319～321

[19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1983. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983

[20] 华孟, 王坚, 著. 土壤物理学. 北京:北京农业大学出版社, 1993. Hua M, Wang J. eds. Soil Physics (In Chinese). Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993

[21] 刘多森. 关于土壤孔隙度测定的商榷. 土壤通报, 2004, 35(2): 152～153. Liu D S. Discussion on the determination of soil porosity (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(2): 152～153

[22] 姚贤良, 程云生, 等. 土壤物理学. 北京:农业出版社, 1986. Yao X L, Cheng Y S. eds. Soil Physics (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986

[23] Reisinger T W, Simmons G L, Pope P E. The impact of timber harvesting on soil properties, and seeding growth in the south. Southern Journal of Applied Forestry, 1988, 12:58～67

[24] 杨小刚, 杨治, 谢恩波. 甘肃几种旱地土壤低吸力段持水量的初步研究. 土壤通报, 1994, 25(4):155～157. Yang X Z, Yang Z, Xie E B. Moisture retention properties in low absorbing stretches of several types of arid land soils in Gansu (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25 (4):155～157

[25] Colman E A. The dependence of field capacity upon the depth of wetting of field soils. Soil Sci., 1994, 58:43～50

[26] Smith R M, Browning D R. Soil moisture tension and pore space relations for several soils in the range of the "Field capacity". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1947, 12:17～21

[27] 周择福, 李昌哲. 北京九龙山不同植被土壤水分特征的研究. 林业科学研究, 1994, 7(1):48～53. Zhou Z F, Li C Z. Study on soil moisture characteristics of different vegetations in Jiulongshan, Beijing (In Chinese). Forest Research, 1994, 7 (1):48～53

[28] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响. 土壤学报, 1998, 35(1):1～9. Shan X Z, Wei Y Q, Yan H J, *et al*. Influence of organic matter content on soil hydrodynamic parameters (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1):1～9

[29] 贾宏涛, 白光宏, 武红旗, 等. 土水分物理性质初步研究. 新疆农业大学学报, 2000, 23(1):12～17. Jia H T, Bai G H, Wu H Q, *et al*. Study on moisture physical property of Lou soil (In Chinese). Journal of Xinjiang Agricultural University, 2000, 23 (1):12～17

EFFECT OF COMPACTION ON SOIL WATER CHARACTERISTICS —A CASE STUDY OF NANJING

Yang Jinling Zhang Ganlin† Zhao Yuguo Zhao Wenjun He Yue Ruan Xinling

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract This study took Nanjing as a target area and aimed to establish relationships between compaction and soil water characteristic parameters by determining soil bulk density, porosity and soil water characteristic curves as affected by different land uses, including function zones, vegetation types and years of land use. Function zones were differentiated as residential area, park, campus, road greenbelt in the city zone and vegetable garden in the suburb. Vegetation types included lawn, lawn and tree, arbor and shrub, vegetable and no vegetation. Land-use ages varied from the newly transported soils (used for less than 5 years) to the old soils (used for more than 20 years in the studied areas). Therefore, the studied soils were typical and could show the major soil uses in Nanjing. Bulk density and porosity were selected as the indicators of soil compaction. Water characteristic parameters included field moisture capacity, wilting point moisture content and available moisture content. The results show that urban soils were severely compacted as compared to surrounding suburb soils. The bulk density of most soils in the city exceeded that of normal soils ($1.30\ g\ cm^{-3}$). The porosity decreased significantly, especially aeration porosity. Bulk density and aeration porosity were good indicators of soil compaction, showing significant relationship with field moisture capacity. Wilting point moisture content was also related to bulk density and aeration porosity. With the increase in soil compaction degree, field moisture capacity and wilting point moisture content of the soil increased, while potentially available moisture content decreased obviously. So compaction weakens the capacity of soils in regulating water supply and makes plants more vulnerable to drought.

Key words Urban soil; Compaction; Soil water characteristics