

城市“土壤水库”库容的萎缩及其环境效应^①

杨金玲, 张甘霖*

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

带格式的: 缩进: 首行缩进: 0 字符

带格式的: 字体: 8 磅

删除的内容: (

删除的内容: (

删除的内容:)

删除的内容:)

摘 要: “土壤水库”具有容纳和调节水分的功能, 不仅能供给植物生长所需的水分, 而且具有防洪减灾的作用。城市土壤的水分储蓄和调节功能对于城市生态环境具有非常重要的作用。城市化造成了大量的封闭地表, 使得土壤的功能几乎完全丧失。本文以南京市为例, 选择不同压实程度的土壤, 根据其饱和含水量、田间持水量和萎蔫点含水量计算土壤的总库容、有效库容、滞洪库容和死库容。结果表明, 随着城市土壤压实程度的增加, 土壤水库的总库容、有效库容和滞洪库容萎缩也越严重, 而死库容却明显增加。城市土壤普遍存在压实现象, 使城市土壤疏导和容纳水分的能力减弱, 城市里出现瞬时洪涝的几率增加, 强度加大。因此, 良好的城市环境需要有更多的绿地和良好的土壤条件。

关键词: 城市土壤; 土壤水库; 压实; 城市化; 地表封闭

中图分类号: S152

删除的内容:

带格式的: 缩进: 首行缩进: 0 字符

带格式的: 字体: 宋体

带格式的: 字体: (默认) 黑体, (中文) 黑体

带格式的: 紧缩量 0.05 磅

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: ,

删除的内容: ,

删除的内容:

土壤具有容纳水分的能力, 有人形象地称之为“土壤水库”^[1-3], 土壤水库具有庞大的库容, 而且具有“不占地、不垮坝、不怕淤、不耗能、不需要特殊地形”等优点^[2]。土壤水库对生态环境的可持续发展具有重要的意义。首先土壤水库是植物生长水分的重要源泉, 植物在整个生长发育过程中对水分的需求是连续不断的, 而大气降水和灌溉都是间歇性供水, 不能经常不断地满足植物对水分的需求。土壤水库不仅能使间歇性的不均匀供水变为对植物的连续均匀供水, 而且对满足植物总需水量要求也有重要的调节作用。所以土壤水库具有良好的水稳性和自动调节能力。其次, 土壤水库具有防洪减灾的重要作用, 土壤学家认为长江上游土壤水库的破坏是 1998 年长江洪水产生的重要原因之一^[3]。由于长江流域水土流失, 近数十年来, 仅上游地区累计损失土壤水库容高达 150~200 多亿 m³, 与三峡工程的防洪库容 (221.5 亿 m³) 基本相当^[4]。在上游损失多少土壤水库容, 在中、下游则相应增加等量的洪水, 这是水土流失加大长江中下游洪峰与流量不可忽视的重要原因之一。所以, 土壤水库对于减少地表径流量、降低降雨洪峰、减少洪涝具有重要的意义。

城市土壤同样具有一定的蓄水能力, 也具有供给和调节植物生长所需要的水分和防洪减灾的重要作用。城市土壤与一般的农田土壤相比, 在减少城市降雨瞬时洪涝灾害方面具有更加重要的环境意义。但由

于城市土壤普遍存在压实退化现象, 压实造成城市土壤孔隙度降低^[5-6], 尤其是大孔隙减少。那么压实对城市土壤水库有何影响呢? 本文对南京市不同压实程度土壤剖面的库容进行了研究, 并探讨了城市化所引起的城市地表封闭和土壤压实带来土壤水库的损失, 旨在为城市生态环境建设和人们生活质量的提高和改善提供依据。

1 材料与方法

选择南京市不同压实程度的土壤剖面, 测定土壤的饱和含水量、田间持水量、萎蔫点含水量。采用土壤压力板 (膜) 法测定土壤水分特征曲线^[7], 饱和含水量的测定采用环刀法^[8], 田间持水量为 0.3×10⁵ Pa 时的含水量, 萎蔫点含水量为 15×10⁵ Pa 时的含水量。由于剖面样品的采集在 7、8 月份, 正值雨季, 南京的地下水位比较高, 一般在 50~60 cm 就出现地下水。所以本研究仅计算 50 cm 土层的土壤水库。

土壤库容可以细分为死库容、有效库容、滞洪库容和总库容^[2]。凋萎含水量是植物所不能利用的含水量, 由此产生的库容被认为是死库容。田间持水率和凋萎含水量之间蓄水量为有效库容, 当土壤含水率大于田间持水率时, 多余水量只能短时间地蓄存于土壤中, 最终经入渗补给地下水或蒸发消耗掉。因此, 该部分库容只起滞蓄作用, 称为滞洪库容。土壤完全饱和时的蓄水量是总库容。

①基金项目: 国家自然科学基金重点 (40235054) 资助。

* 通讯作者 (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地球化学研究。E-mail: jlyang@issas.ac.cn

计算土壤水库库容的公式有两类，一是根据体积质量、质量含水量和土层深度来计算，另一类是根据土壤的基本水分常数和土层深度来计算。本研究采用第2种计算方法，因为这种方法只需要知道3个基本土壤水分常数，即饱和含水量 (θ_s)、田间持水量 (θ_f) 和萎蔫点含水量 (θ_w) (三者都要是体积含水量) 就可以计算土壤水库不同功能的调蓄能力^[2,9-10]。具体计算方法如下：

$$W_t = \frac{\theta_s \times M \times h}{100M} \times 10 = 0.1 \times \theta_s \times h$$

所以，

$$W_t = 0.1 \times \theta_s \times h$$

$$W_f = 0.1 \times \theta_f \times h$$

$$W_d = 0.1 \times \theta_w \times h$$

$$W_y = W_f - W_d$$

$$W_h = W_t - W_f$$

式中， W_t 为某层土壤水库的总库容 (mm)； θ_s 为饱和水量 (%)； M 为面积 (cm^2)； h 为某土层厚度 (cm)； W_f 为田间含水量对应的库容，相当于有效库容和死库容之和； W_d 为死库容； W_y 为有效库容； W_h 为滞洪库容； θ_f 为田间持水量 (%)； θ_w 为萎蔫点含水量 (%)。

2 结果与讨论

2.1 城市土壤水库库容的萎缩

将不同压实程度的土壤剖面分别进行计算，其具体库容状况见图1。从图中可以看出，极疏松土壤的总库容最大，随着压实程度的增加，土壤的总库容减少，这主要是由于压实引起土壤的总孔隙度减少所造成的^[5]。从滞洪库容来看，随着土壤的压实程度增加，库容量明显下降，这是由于随着压实程度的增加，土壤中的大孔隙显著减少的原因^[11-12]。从死库容来看，随着土壤压实程度的增加，库容量显著增加，这主要是由于土壤萎蔫点的含水量随着压实程度的增加而呈线性增加所引起的^[13]。从有效库容来看，似乎与压实程度无关，实际不然，有效库容与土壤的有效孔隙度密切相关，极疏松土壤的总孔隙度虽然很大，但是由于非常疏松，主要是大的通气孔隙，而毛管孔隙很少。所以疏松的土壤通过适度的压实可以增加田间持水量，这也是干旱地区蓄水保墒的重要措施之一^[14]。当土壤达到适度的压实程度，其有效水含量达到最高值。此时进一步压实会减少土壤中的有效孔隙，使得土壤有效库容显著减少。

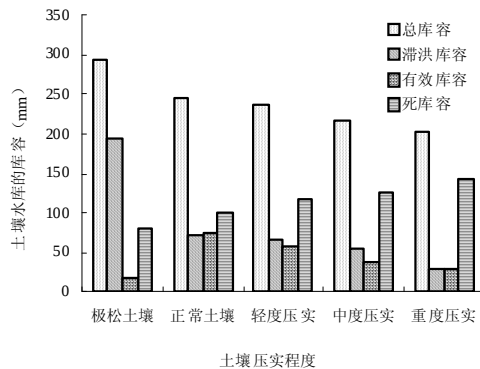


图1 不同压实程度土壤水库的库容

Fig. 1 Capacity of soil water reservoir at different compaction degrees

图1也非常直观地反映了压实对于城市土壤水库库容的影响以及不同功能的库容量与总库容的比例关系。从图1中可以看出，城市土壤的压实对土壤总库容虽然有所减少，但程度并不很大。而土壤死库容占总库容的比例越来越大，从27.6%增加到70.2%；而土壤滞洪库容占总库容的比例越来越小，从66.4%减少到15.0%。可见，在城市里研究土壤水库库容的大小和作用时，不能仅注重总库容的大小，因为土壤压实会引起无效水含量增加，土壤死库容扩充，而滞洪库容严重萎缩，有效库容也有一定程度的下降，这使得城市土壤有效水含量下降，植物不耐干旱。所以在城市里涉及土壤水库时，必须将土壤水库的库容分别进行计算，将不同功能的库容分开来才能说明问题。

2.2 城市地表封闭导致的土壤水库库容损失

近年来，城市洪涝现象越来越多，经常在雨季出现大面积的瞬时洪涝，给城市居民的生活和交通造成不便，也往往造成一定的经济损失。这与城市化的地表封闭和地表压实密切相关。

城市在不断的扩张过程中侵占了大量的土地，这不仅是土地的损失，也是土壤水库库容的大量损失。因为城市化过程中使得许多自然土壤转变为封闭地表或城市土壤，封闭地表使土壤完全失去蓄水的能力，而城市土壤的压实引起土壤蓄水能力下降，造成库容萎缩。城市扩张占用的往往是农地，农地又分为两类，一类是旱地，主要是城市周边的菜地；另一类是水稻田，尤其是在长江三角洲一带的“水稻之乡”。由于旱地土壤与水田土壤的蓄水能力不同，所以将两类土地分开来讨论。

城市扩张侵占农地后，封闭地表成为具有一定压实程度的绿地土壤。图2显示从菜地转变为城市土壤，

删除的内容：

带格式的：页眉，两端对齐

删除的内容：

带格式的：字体：小五

删除的内容：

删除的内容：<sp>

删除的内容：

<sp>

带格式的：行距：固定值
16 磅

带格式的：字体：非倾斜，
下标

带格式的：字体：非倾斜，
下标

带格式的：制表位：227.2
磅，左对齐

带格式的：字体：非倾斜，
下标

删除的内容：即

带格式的：字体：宋体

删除的内容：（注意公式中
字体大小）

带格式的：行距：多倍行距
1.1 字形

删除的内容：

带格式的：字体：（默认）
黑体，（中文）黑体

带格式的：居中，行距：固
定值 13 磅

带格式的：居中

带格式的：居中，行距：固
定值 13 磅

带格式的：行距：固定值
15.5 磅

带格式的：字体：非倾斜，
下标

删除的内容：

带格式的 ... [1]

带格式的 ... [2]

带格式的 ... [3]

带格式的 ... [4]

带格式的 ... [5]

带格式的 ... [6]

带格式的 ... [7]

带格式的 ... [8]

带格式的 ... [9]

带格式的 ... [10]

不同的绿地面积比例和封闭地表比例情况下,土壤水库的损失情况(仍然按照 50 cm 土层的深度计算土壤水库)。将地表完全封闭时,土壤水库完全损失,每平方公里的土地将损失 24.62 万 m^3 的蓄水能力,随着绿地面积比例的增加,封闭地表比例的减少,土壤总库容的损失量逐渐减少。100% 的未压实绿地土壤是不会造成土壤水库库容损失的。从滞洪库容看,如果菜

地土壤转变为完全封闭的地表,土壤的滞洪库容将会损失 7.20 万 m^3/km^2 ,随着封闭地表比例的减少,绿地比例的增加,土壤滞洪库容的损失成比例减少。所以,在城市化的过程中,地表封闭造成的土壤水库库容的损失是非常大的,这也是城市中容易形成瞬时洪涝的主要原因之一,同时会带来地表径流量的加大,增加城市下游河道的洪水量,容易引起大面积的洪涝灾害。

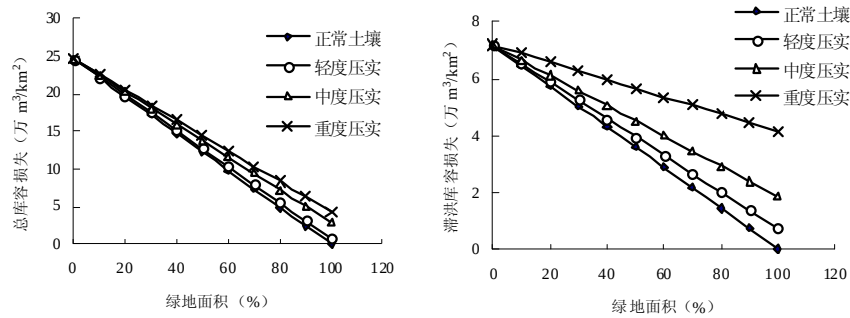


图 2 绿地面积比例与土壤水库库容的关系

Fig. 2 Relationships between percentage of greenbelt area and capacity of soil water reservoir

如果由水稻田转变为城市土壤,情况与菜地土壤又有所差异,因为依据常态测算,稻田可维持将近 10 cm 的水层,遇暴雨可达 15 cm^[15]。这样,水稻田比一般旱地可以多蓄 15 万 m^3/km^2 的雨水。城市化每占用 1 km^2 水稻田就会多损失 15 万 m^3 的土壤水库的库容。

2.3 城市土壤压实带来的土壤水库库容损失

从图 2 还可以看出,当自然土壤转变为城市绿地土壤以后,在不同压实程度下,土壤库容的损失情况是有差异的。无论是总库容还是滞洪库容都随着压实程度的增加,损失量加大。总库容的损失相对于滞洪库容而言,由于压实而引起的损失比例较小。滞洪库容的损失受压实程度的影响非常大,由菜地土壤转变为重度压实土壤,其滞洪库容减少 41.5 mm,相当于 4.15 万 m^3/km^2 ,这将在城市中增加相应量的瞬时洪水。可见,压实也是引起城市洪涝的重要原因之一。

按照南京市的绿化率为 40% 计算,由菜地转化为城市用地后,在不同压实程度下,土壤总库容损失 14.77 ~ 16.49 万 m^3/km^2 ,土壤滞洪库容损失 4.32 ~ 5.98 万 m^3/km^2 。如果是由水稻田换变为城市用地后,在不同的压实程度下,土壤总库容损失 29.77 ~ 31.49 万 m^3/km^2 ,土壤滞洪库容损失 19.32 ~ 20.98 万 m^3/km^2 。调查表明,1990 年前后,苏南有 333 km^2 稻田,到 2003 年仅剩下 113 km^2 ^[15],这主要是由城市扩张所引起的。这 220 km^2 稻田的总库容损失为 0.65 ~ 0.69 亿 m^3 。这

种滞洪能力的损失无疑会对区域的径流形成产生显著的影响,极大地增加区域洪涝灾害的危险。

3 讨论

土壤作为一个水库,应具备两个条件:一是水源,二是库容。土壤水库的水源主要是大气降水和人工灌溉补给。库容的大小与土壤水分的有效性和调控深度密切相关。一个良好的天然土壤水库,应该土层深厚、结构良好,对水分具有渗透性、持水性、移动性和相对稳定性以及吐纳、调节水分的功能,为植物生长发育提供较好的生存空间,并且能够起到防止洪涝的作用。

在城市环境中,土壤水库除具有供给和调节植物生长所需要的水分外,更重要的作用是减少城市降雨时瞬时洪涝。因为在城市里,存在大量的封闭地表,使得降雨径流系数非常大。封闭地表除了降雨时少量的蒸发外,全部形成地表径流。虽然城市绿地土壤面积比例并不占优势,而且又呈斑块状镶嵌分布,但对于减少和减弱瞬时洪涝却具有极其重要的意义。城市土壤水库滞洪库容起着最主要的作用。

但是由于城市土壤压实,结构破坏,孔隙度降低,尤其是大孔隙随着压实程度的增加显著地减少,使得城市土壤滞洪库容急剧下降,因为滞洪库容是大孔隙中所容纳的水分。另外,城市表层土壤的压实也会使

删除的内容:

删除的内容:

带格式的: 字体: 10 磅

带格式的: 下标

删除的内容:

带格式的: 字体: (默认) 黑体, (中文) 黑体

带格式的: 无网格, 列数: 2

删除的内容: 2.4

带格式的: 上标

删除的内容: 平方公里

删除的内容: ,

删除的内容: 的

水分进入土壤水库的通道受阻，土壤水库就不能起到调蓄的作用；有时表层结壳虽然只有几毫米厚，但严重地阻碍了雨水进入土壤水库，也导致土壤水库起不到调蓄作用，从而加快了地表径流的形成^[1]。孔隙的减少、渗透性能的丧失，也阻断了雨水进入地下，使得地表瞬时洪涝加剧，而地下水又得不到补给，也是形成地下水位下降和地下漏斗的原因之一^[16]。

城市化不仅侵占农地，而且引起土壤水库的库容严重损失，这对于城市瞬时洪涝和城市下游的洪涝形成具有非常大的影响。所以，城市化和城市土壤压实也是近些年来洪涝灾害频繁发生的因素之一，对于城市环境和城市生态具有一定的负面影响。

从城市生态环境和提高人们生活质量的角度来看，在城市扩张的过程中应该尽量减少封闭地表。在人行道上尽量使用允许渗漏的覆盖物，可以部分地保留土壤对水分的疏导和容纳能力。在绿地建设的过程中，尽量避免压实土壤，对于已经压实的土壤要先进行机械松土，然后再种植草坪或树木。对于已经建设好的草坪，要避免人为践踏，尤其不要在雨后湿润的草坪上活动，此时特别容易压实土壤，且压实后的土壤很难恢复。

4 结论

(1) 城市土壤压实会导致土壤结构破坏和孔隙度下降，从而使城市土壤水库的库容量减少，特别是有效库容减少和滞洪库容急剧下降，但死库容却明显增加。

(2) 评价城市土壤的水分调节能力仅依靠土壤总库容的大小是不够的，必须分别计算不同功能的库容量。城市土壤有效库容的下降，使得城市土壤有效水含量减少，不耐干旱；滞洪库容的萎缩，使得城市土壤对于减少瞬时洪涝的能力下降，城市里出现瞬时洪涝的几率增加，强度加大。

(3) 由于城市化造成大量地表封闭，使得城市土壤的功能几乎完全丧失。城市绿地土壤对于城市洪涝的缓解具有非常大的作用，而土壤的压实使得土壤有效库容和滞洪库容萎缩，城市土壤疏导和容纳水分的能

力减弱，因此在雨季非常容易引起城市洪涝。

参考文献：

- [1] 史学正，梁音，于东升. “土壤水库”的合理调用与防洪减灾. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 6-10
- [2] 郭凤台. 土壤水库及其调控. 华北水利水电学院学报, 1996, 17(2): 72-80
- [3] 梁音，史学正，史德明. 从长江上游地区水土流失及“土壤水库”分析 1998 洪水. 中国水土保持, 1998, (11): 32-34
- [4] 史德明. 长江流域水土流失与洪涝灾害关系剖析. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 1-7
- [5] 杨金玲，张甘霖，赵玉国，阮心玲，何跃. 土壤压实指标在城市土壤评价中的应用与比较. 农业工程学报, 2005, 21(5): 51-55
- [6] 杨金玲，张甘霖. 城市功能区、植被类型和利用年限对土壤压实的影响. 土壤, 2007, 39(2): 263-269
- [7] 姚贤良，程云生. 土壤物理学. 北京：农业出版社, 1986
- [8] 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
- [9] 孙仕军，丁跃元，曹波，田园. 平原井灌区土壤水库调蓄能力分析. 自然资源学报, 2002, 17(1): 42-47
- [10] 辜世贤，熊亚兰，徐霞，魏朝富，刘刚才. 土壤水库与降水资源化研究进展. 西南农业学报, 2003, 16(增刊): 29-32
- [11] Jim CY. Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical & subtropical urban habitats. Environmental Conservation, 1993, 20(1): 35-49
- [12] 牛海山，李香真，陈佐忠. 放牧率对土壤饱和导水率及其空间变异的影响. 草地学报, 1999, 7(3): 211-216
- [13] 杨金玲，张甘霖，赵玉国，赵文君，何跃，阮心玲. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响—以南京市为例. 土壤学报, 2006, 43(1): 33-38
- [14] 邓振镛，方德彪，仇化民. 甘肃东部旱作区土壤水库贮水力的研究. 应用气象学报, 1996, 7(2): 169-174
- [15] 章敬平. 见证江南鱼米之乡衰落全过程. 南风窗, <http://www.sina.com.cn>. 2003
- [16] Brakensiek DL, Rawls WJ. Soil containing rock fragments: Effects on infiltration. Catena, 1994, 23: 99-110

删除的内容：

带格式的：页眉，两端对齐

删除的内容：

删除的内容：：

带格式的：字体：小五

删除的内容：[1]

带格式的：项目符号和编号

删除的内容：[2]

删除的内容：[3]

删除的内容：，

删除的内容：[4]

删除的内容：[5]

删除的内容：[6]

删除的内容：[7]

删除的内容：[8]

删除的内容：[9]

删除的内容：[10]

删除的内容：3

删除的内容：[11]

删除的内容：[12]

删除的内容：[13]

删除的内容：[14]

删除的内容：[15]

带格式的：默认段落字体，字体颜色：黑色

删除的内容：[16]

删除的内容：—

带格式的：节的起始位置：连续

Loss of Soil Water Capacity in Urban Areas and It’s Impacts on Environment

YANG Jin-ling, ZHANG Gan-lin

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

带格式的: 行距: 固定值
12 磅

删除的内容: i

带格式的: 字体: 六号

Abstract: Urban soil water “reservoir” can not only supply water to plants, but also minimize flooding risk by holding and adjusting soil water balance. Surface sealing during urbanization can weaken soil environmental buffering function which is very important to urban eco-environment. This study estimated the total soil water storage capacity, available water storage capacity, short time water storage capacity and invalid water storage capacity based on the saturation moisture content, field water moisture capacity and wilting point moisture content of different compacted soils in Nanjing. The results showed that with the increase of urban soil compaction, the total soil water storage capacity, available water storage capacity and short time water storage capacity reduced gradually, but the invalid water storage capacity increased gradually. As urban soil compaction is ubiquitous, its ability in discharging and holding water reduces, which often causes rapid urban flooding. In general, more open space with suitable soil condition is needed for an ecologically-sound urban environment.

Key words: Urban soil, Soil reservoir, Compaction, Urbanization, Earth surface sealed

页 993: [1] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:50:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [2] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-01 10:41:00
-----------------	----------	---------------------

行距: 固定值 16 磅

页 993: [3] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:53:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [4] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:53:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [5] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:53:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [6] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:53:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [7] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:54:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [8] 带格式的	xuxiaoyu	2008-12-01 8:54:00
-----------------	----------	--------------------

字体: 非倾斜, 下标

页 993: [9] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-01 10:41:00
-----------------	----------	---------------------

1 级, 行距: 固定值 16 磅

页 993: [10] 带格式的	xuxiaoyu	2008-11-01 10:41:00
------------------	----------	---------------------

行距: 固定值 16 磅