

# 紫色丘陵区城镇化不同地貌单元的水文特征 及土壤重构\*

娄义宝<sup>1</sup> 史东梅<sup>1†</sup> 蒋平<sup>2</sup> 李叶鑫<sup>3</sup> 林姿<sup>1</sup> 蒲境<sup>1</sup>

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

(2 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院, 重庆 400020)

(3 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要** 城镇化过程中由于开挖、堆垫以及路面硬化等建设活动, 造成各种扰动地貌单元, 其中, 弃土弃渣堆积体是城镇主要的绿化用地及城市绿地建设客土来源; 扰动地貌与原地貌单元共同组成城镇建设项目区的复杂下垫面。采用野外和室内试验方法, 系统地比较了城镇建设中不同地貌单元的物质组成、入渗和持水性能的差异性, 并探讨了三种城市土壤重构类型及其减缓城市内涝的潜在作用。结果表明: (1) 不同地貌单元土壤容重差异显著 ( $p < 0.05$ ), 施工便道 ( $1.74 \text{ g cm}^{-3}$ )  $>$  2年弃渣堆积体 ( $1.58 \text{ g cm}^{-3}$ )  $>$  2月弃渣堆积体 ( $1.52 \text{ g cm}^{-3}$ )  $>$  荒草地 ( $1.47 \text{ g cm}^{-3}$ )  $>$  坡耕地 ( $1.34 \text{ g cm}^{-3}$ )  $>$  人工林地 ( $1.32 \text{ g cm}^{-3}$ ), 弃渣堆积体平台处土壤容重均大于边坡处。(2) 不同地貌单元土壤稳定入渗率均表现为弃渣堆积体边坡 $>$ 原地貌 $>$ 弃渣堆积体平台; 弃渣堆积体平台处稳定入渗率大小主要受平台压实过程中可能存在的滞水层影响。(3) 不同地貌单元的各种土壤水库特征中库容差异显著 ( $p < 0.05$ ), 扰动地貌单元的总库容 ( $378.7 \text{ t hm}^{-2}$ ) 小于原地貌单元 ( $472.6 \text{ t hm}^{-2}$ ); 扰动地貌单元总库容表现为2年弃渣堆积体 $>$ 2月弃渣堆积体 $>$ 施工便道, 原地貌单元则表现为人工林地 $>$ 坡耕地 $>$ 荒草地。(4) 城市绿地土壤重构类型主要有乔木适生型土壤构型、灌木适生型土壤构型和草本适生型土壤构型, 土层厚度、容重、 $<2 \text{ cm}$  砾石含量和有机质是影响重构土壤质量的关键因素; 重构土壤类型(草本适生型、乔木适生型、灌木适生型)可保证草本植物在定植后2个月、乔灌木在定植后4~5个月左右充分发挥其调控地表径流、缓解城市内涝的潜在作用。研究结果可为三峡库区城镇化建设中绿地建设和城市洪水调控提供科学依据。

**关键词** 地貌单元; 入渗性能; 持水性能; 土壤重构; 城镇化; 紫色丘陵区

中图分类号 S157.1

文献标识码 A

近年来, 随着城镇化进程, 房地产、道路等建设项目数量增加的同时规模也日益扩大。城镇建设会导致城区土地利用方式发生根本改变, 如清除树木、平整土地, 建造房屋、街道以及整治排水河道等, 均会改变城市及周围的水系生态环境和水系循环, 直接影响当地的径流流量、峰值等水文特征, 进而导致城市洪涝灾害频发<sup>[1]</sup>。由于大面积自然地貌被房屋、道路、混凝土及砖石地面人为环境和人为下垫面所取代<sup>[2]</sup>, 不透水层增加使得原地面径流系数增大、汇流时间缩短、洪水总量和洪峰流量增大, 城市河流洪水灾害的发生频率增加<sup>[3]</sup>。同时, 城镇化建设可在短期内使原土壤结构、入渗特性和持水性能发生巨大变化, 不利于后期城市园林景观营造。相关研究表明, 新堆积土体入渗速率( $1.6 \text{ mm min}^{-1}$ )高于原状土( $1.1 \text{ mm min}^{-1}$ ), 随着堆积时间的延长逐渐减小至原状土水平<sup>[4]</sup>; 砾石含量和孔隙比是土石混合体渗透系数的最主要影响因素, 对入渗系数增大起着正向促进作用<sup>[5]</sup>; 同时, 城市土壤孔隙度由于压实作用均较原地貌变小, 这又降低了土壤入渗性能和水库库容<sup>[6]</sup>。紫色砂岩风化土速率快, 其成土率、化泥率分别为4.52%、0.56%<sup>[7]</sup>,

\* 重庆市水利局科技项目(20130233)资助 Supported by the Science and Technology Project of Chongqing Municipal Water Conservancy Bureau in China (No. 20130233)

† 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shidm\_1970@126.com

作者简介: 娄义宝(1993—), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: yibao93@126.com

收稿日期: 2017-12-06; 收到修改稿日期: 2018-01-16; 优先数字出版日期(www.cnki.net):

<http://pedologica.issas.ac.cn>

这些特性可为城市土壤重构和植被恢复提供有利条件。平原和城市的建设项目应保存和利用表土（农田耕作层），控制城市硬化面积，综合利用地表径流。目前，国内外对城镇建设侵蚀环境<sup>[8]</sup>、不同地貌单元产流产沙规律<sup>[9-10]</sup>及城市化过程水涝灾害发生特点<sup>[11]</sup>等研究较多，而对城镇化建设中扰动地貌单元和原地貌单元入渗性能、持水性能的对比研究相对较少，从城市绿化用地和土壤重构类型的角度揭示弃土弃渣堆积体的水文特性、植被恢复时间、减缓城市内涝的潜在作用等方面研究较少。因此，本文以紫色丘陵区城镇化建设中常见的扰动地貌单元（如弃渣场、施工便道等）和原地貌单元（如坡耕地、人工林地等）为研究对象，从弃土弃渣堆积体作为城市绿化用地和客土来源的角度，研究了不同地貌单元的水文变化特性及土壤重构类型，旨在对比分析各种地貌的土壤入渗和土壤持水性能的差异及原因，分析扰动地貌单元的土壤重构类型及植被恢复适宜性，研究结果可为城镇建设项目区绿化用地建设和洪水调控提供科学依据。

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区缙云文化体育中心，地处 106°18'14"E、29°39'10"N，海拔 230 m，年平均气温 18.3℃，年降水量 1 157 mm，5—9 月的降水量占全年降水量的 70%。研究区主要土壤类型为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥页岩母质上发育的中性紫色土。主要植被有蕨类(*Pteridophyta*)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、宽叶台草(*Carex siderosticta* Hance) 等。项目区的扰动地貌单元主要包括 2 月弃渣堆积体、2 年弃渣堆积体和施工便道等，原地貌单元包括坡耕地（植被为玉米，小麦/玉米/红苕轮作，行间距为 0.5 m×0.5 m）、荒草地（自然撂荒地 2 a，植被为狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、油蒿(*Artemisia ordosica*) 等）和人工林地（植被为十年生桑树，其他杂草，行间距为 2 m×2 m）。各种地貌单元基本情况见表 1。

表 1 研究区不同地貌单元的基本情况

Table 1 Description of different landform units in the study area

地貌类型 Landform type	地貌单元 Landform unit	坡度 Slope (°)	植被覆盖度 Vegetation coverage (%)	有效土层厚度 Thickness of effective soil layer (cm)	弃渣堆放时间 Stacking time
扰动地貌 Disturbed landform unit	DSP <sub>2m</sub>	3	0	0	2 个月 2 months
	DSS <sub>2m</sub>	30	8	0	2 个月 2 months
	DSP <sub>2a</sub>	3	30	0	2 年 2 years
	DSS <sub>2a</sub>	45	15	0	2 年 2 years
	CR	10	5	0	—
原地貌 Original landform unit	SL	5	75	40	—
	WG	8	45	35	—
	AFL	3	80	60	—

注： DSP<sub>2m</sub>： 2 月弃渣堆积体平台； DSS<sub>2m</sub>： 2 月弃渣堆积体边坡； DSP<sub>2a</sub>： 2 年弃渣堆积体平台； DSS<sub>2a</sub>： 2 年弃渣堆积体边坡； CR： 施工便道； SL： 坡耕地； WG： 荒草地； AFL： 人工林地。下同 Note: DSP<sub>2m</sub>: 2-months piles of dumped waste soil; DSS<sub>2m</sub>: Slopes of 2-months piles of dumped waste soil; DSP<sub>2a</sub>: 2-years piles of dumped waste soil; DSS<sub>2a</sub>: Slopes of 2-years piles of dumped waste soil; CR: Construction makeshift road; SL: Cultivated Slope land; WG: Waste grassland; AFL: Artificial forest land. The same below

### 1.2 土壤样品采集与理化性质测定

每种地貌单元均采用多点采样法进行采样，每个地貌单元 3 次重复。对于弃渣堆积体，分别在其平台及边坡采集土壤样品，其中，边坡分上、中、下三个部位采样。对于坡耕地、荒草地和人工林地，采用土壤剖面法分 3 层（即 0~10、10~20 和 20~30 cm），每层土样为 1 个采样点。在每个采样点采集 1 个环刀土

样(环刀体积为 200 cm<sup>3</sup>, 直径为 7.0 cm), 同时在上述每个地貌单元多点采集 5 kg 左右表层土样(0~20 cm) 进行混合, 具体采样位置示意图见图 1。

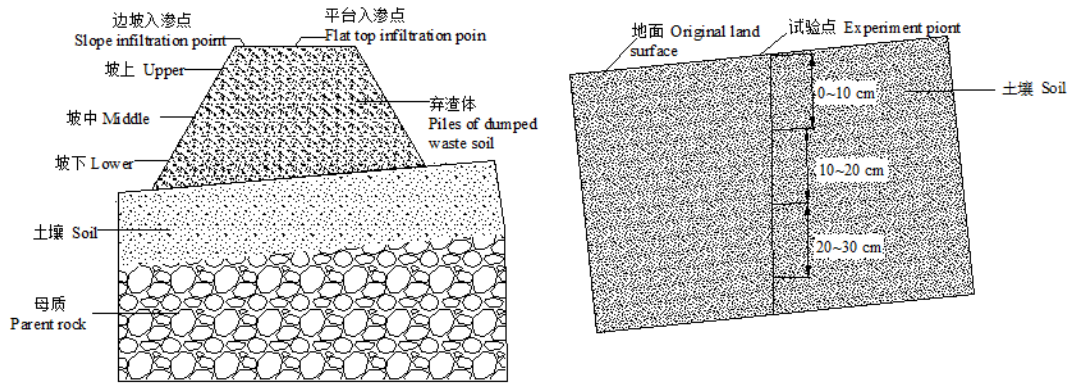


图 1 弃渣堆积体和原地貌试验位置示意

Fig. 1 Sketch map of a pile of dumped waste soil and an original landform

土壤含水量采用烘干法测定; 土壤容重、饱和含水量和田间含水量均采用环刀法测定; 土壤最大吸湿水采用 10% 硫酸溶液法测定, 土壤凋萎含水量为最大吸湿水的 1.5 倍; 土壤颗粒分布特征采用筛分法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定, 土壤全氮采用半微量凯氏法测定, 土壤全磷采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定, 土壤全钾采用氢氧化钠碱熔—火焰光度法测定<sup>[12]</sup>。

### 1.3 土壤入渗及径流性能测定

采用野外双环入渗法<sup>[13]</sup>测定不同地貌单元入渗过程, 其中, 内环直径为 15 cm, 外环直径为 30 cm, 高度为 20 cm。试验时双环垂直打入土中 10 cm, 环内土壤表层保持 5 cm 水层, 并通过马氏瓶向外环加水保持水头恒定, 每隔一定时间向内环加水并记录加水量, 试验时间为 90 min。由于各种地貌单元的入渗试验在同一时间进行, 所以未对土壤入渗率的计算进行水温校正。不同地貌单元的土壤入渗率按下式计算:

$$v = 10Q_n / S / t_n \quad (1)$$

式中,  $v$  为不同地貌单元在某一时刻的土壤入渗率, mm min<sup>-1</sup>;  $Q_n$  为第  $n$  次测定时间内的加水量, ml;  $S$  为渗透面面积, cm<sup>2</sup>;  $t_n$  为第  $n$  次测定时间间隔, min。

不同地貌单元土壤入渗性能各项指标计算方法为:

- (1) 初始入渗率为最初入渗时段内渗透量与入渗时间的比值, 本研究取最初入渗时间为 1 min;
- (2) 平均入渗率为达稳渗时的渗透总量与达稳渗时的时间的比值;
- (3) 稳定入渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率;
- (4) 瞬时入渗率为第  $n$  次测定时间内的加水量与第  $n$  次时间间隔的比值;
- (5) 渗透总量为 90 min 内的入渗量。

径流曲线数 SCS-CN 模型 (Soil conservation service 能够客观反映土壤类型、土地利用方式及前期土壤含水量对次降雨径流过程的影响, 其计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P - 0.8S}, P \geq 0.2S \quad (2)$$

$$Q = 0, P \leq 0.2S \quad (3)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

式中,  $Q$  为次降雨产生的径流量, mm;  $P$  为一次降雨总量, mm;  $S$  为流域当时的最大滞留量, mm; CN 为曲线数值, 为一无量纲参数, 可反映不同下垫面条件对地表产汇流过程的影响。

### 1.4 土壤水库测定

土壤水库指土壤作为一个充满大小空隙的疏松多孔体，具有明显的存贮水分的功能，可用来分析土壤容纳、转移水分的能力和评价土壤持水特性<sup>[15]</sup>。本文参照文献[16]计算各种土壤水库库容指标：

$$Q = R \times h \times S \quad (5)$$

式中， $Q$  为土壤水库库容， $t\text{ hm}^{-2}$ ； $R$  为土壤容重， $g\text{ cm}^{-3}$ ； $h$  为计算土层厚度， $mm$ ； $S$  为土层含水百分率， $\%$ 。其中，当  $S$  为土壤饱和含水量时， $Q_T$  为土壤总库容；当  $S$  为凋萎含水量时， $Q_D$  为土壤死库容；当  $S$  为田间持水量与凋萎水之差时， $Q_U$  为兴利库容；当  $S$  等于饱和含水率与田间持水量之差时， $Q_F$  为滞洪库容；当  $S$  为饱和含水量与凋萎含水量之差时， $Q_M$  为最大有效库容；当  $S$  为天然含水率时， $Q_N$  为实际库容。土壤水库持水效率  $w$  是实际水库与总水库的比值，反映了土壤水库的利用效率以及土壤水库功能的优劣情况。

### 1.5 数据处理

数据统计处理采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 进行分析，其中显著性差异分析采用最小显著差异 (LSD) 法，绘图软件采用 AutoCAD 2008。

## 2 结果

### 2.1 不同地貌单元的土壤理化性质

土壤颗粒组成是最基本的土壤物理性质之一，它影响着土壤的水源涵养功能<sup>[17]</sup>、力学特性及土壤侵蚀<sup>[18]</sup>。分析弃渣与土壤颗粒分布的差异性对充分认识下垫面入渗和持水性能具有重要意义。与原地貌土壤相比，弃渣具有物质成分多样性、结构不均一性和材料介质非连续性等特性<sup>[19]</sup>。由表 2 可见，扰动地貌单元的颗粒分布特征与原地貌土壤差异显著。2 月弃渣堆积体平台的 ( $DSP_{2m}$ ) 土壤粒径主要分布在 2~60 mm (74.59%)，而 <2 mm 粒径含量仅为 25.41%；土壤颗粒分布不均匀，其控制粒径最大 (12 mm)，而中间粒径、有效粒径则较小。坡耕地土壤颗粒主要集中在 2~10 mm，其含量为 52.8%，控制粒径、中间粒径和有效粒径分别为 3、1.2、0.3 mm，表明级配良好。除 2 a 边坡外，各种扰动地貌单元的土体控制粒径均大于坡耕地和荒草地；2 年弃渣堆积体较 2 月的分别减小了 66.67%、30%。由此可见，随着堆放时间的延长，扰动地貌土体粒径分布与原地貌差异减小，这主要是植被恢复改善了扰动地貌的土壤粒径组成。

表 2 不同地貌单元的土壤颗粒分布特征

Table 2 Soil particle size distribution relative to landform unit

地貌单元 Landform unit	粒径组成 Fraction (%)											控制粒径	中间粒径	有效粒径
	60~40 <sup>1)</sup>	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075	<0.075	Dominant diameter	Median diameter $d_{50}$	Effective diameter $d_{10}$
												$d_{60}$ (mm)	(mm)	$d_{10}$ (mm)
$DSP_{2m}$	10.24	15.99	15.96	17.17	15.23	4.01	6.62	2.89	5.84	2.39	3.66	12	2.8	0.2
$DSS_{2m}$	0	1.27	9.86	21.27	31.93	8.24	10.80	3.84	5.90	1.92	4.97	4	1.5	0.18
$DSP_{2a}$	0	5.07	11.76	16.38	26.75	5.96	10.45	4.73	10.19	3.56	5.15	4	0.8	0.12
$DSS_{2a}$	0	1.07	5.12	13.17	31.01	7.23	11.55	5.14	15.73	4.12	5.87	2.8	0.45	0.1
CR	0	20.99	19.02	25.54	9.00	4.19	10.51	6.17	4.19	0.07	0.32	10	3.8	0.5
SL	0	0	6.14	17.84	34.96	11.81	16.79	4.15	2.15	2.67	3.49	3	1.2	0.3
WG	0	0	11.19	17.71	29.41	9.88	13.45	4.22	4.59	4.15	5.4	3.5	0.7	0.12
AFL	0	0	20.85	18.66	25.67	8.6	10.08	6.99	1.57	3.19	4.39	5	1.6	0.3

注：1) 表示粒径，单位 mm Note: 1) particle size, unit mm

由不同地貌单元的土壤基本理化性质 (表 3) 可见，扰动地貌单元平均土壤容重 ( $1.59\text{ g cm}^{-3}$ ) 显著大于原地貌单元 ( $1.38\text{ g cm}^{-3}$ )，不同地貌单元土壤容重大小依次为施工便道 ( $1.74\text{ g cm}^{-3}$ ) > 2 年弃渣堆积体平台 ( $1.60\text{ g cm}^{-3}$ ) > 2 年弃渣堆积体边坡 ( $1.56\text{ g cm}^{-3}$ ) > 2 月弃渣堆积体平台 ( $1.55\text{ g cm}^{-3}$ ) > 2 月弃渣堆

积体边坡 ( $1.49 \text{ g cm}^{-3}$ ) > 荒草地 ( $1.47 \text{ g cm}^{-3}$ ) > 坡耕地 ( $1.34 \text{ g cm}^{-3}$ ) > 人工林地 ( $1.32 \text{ g cm}^{-3}$ )。各扰动地貌单元土壤容重差异显著, 弃渣堆积体平台处土壤容重大于边坡处, 其土壤容重均在  $1.49 \text{ g cm}^{-3}$  以上。这主要是由于弃渣平台在堆弃过程中存在机械压实和人为平整活动, 同时, 其细颗粒物在降雨—径流—下渗连续作用下, 随着土体表面和内部孔隙发生移动、聚集现象, 从而导致土壤容重显著增大 ( $p < 0.05$ ); 而弃渣边坡自然定居的植被覆盖较平台处高, 在植被作用下土壤容重降低。由此可见, 各种扰动地貌单元容重严重超过植物生长所需的理想值 ( $0.9 \sim 1.49 \text{ g cm}^{-3}$ ), 因此, 弃渣堆积体作为城镇绿化用地需要覆盖、疏松表土, 以促进绿化植被及早发挥其调控径流的潜在作用。

表 3 不同地貌单元的基本理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties relative to landform unit

地貌单元 Landform unit	容重 Soil bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	天然含水量 Natural soil water content (%)	饱和含水量 Saturated soil water content (%)	田间持水量 Field water holding capacity (%)	凋萎含水量 Wilting point of soil moisture content (%)	有机质 Organic matter (g $\text{kg}^{-1}$ )
DSP <sub>2m</sub>	1.55±0.03c	10.18±0.25ab	24.02±2.31de	21.52±2.36bcd	4.10±0.89d	4.10±0.51c
DSS <sub>2m</sub>	1.49±0.07d	4.31±1.88 d	29.11±6.46c	23.59±4.67bc	4.42±0.77cd	2.87±0.18c
DSP <sub>2a</sub>	1.60±0.08b	5.22±0.43d	22.24±3.16ef	17.21±1.68cd	3.92±1.09d	10.23±1.67b
DSS <sub>2a</sub>	1.56±0.02bc	5.73±1.79d	28.15±2.26cd	19.28±8.65cd	4.85±0.03bc	11.46±3.51ab
CR	1.74±0.06a	8.60±0.58bc	18.36±1.05f	16.57±2.36d	1.80±0.64e	3.99±0.49c
SL	1.34±0.12e	10.11±1.02ab	34.50±2.48b	33.60±3.19a	6.05±0.75a	11.02±1.03ab
WG	1.47±0.17d	7.40±0.85c	27.85±2.69cd	21.36±4.16bcd	4.34±0.98d	13.14±1.45a
AFL	1.32±0.09e	10.60±0.79a	41.37±4.21a	26.60±2.98b	5.09±1.06b	11.28±2.06ab

注: 同列数据不同字母表示处理在  $p > 0.05$  水平差异显著。下同 Note: Different letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level. The same below

田间持水量是土壤毛管悬着水达到最大时土壤所能保持的水分, 是反映土壤持水性能的重要指标<sup>[20]</sup>。不同地貌单元的田间持水量存在一定差异(表 3), 扰动地貌单元的平均田间持水量(19.63%)小于原地貌单元(27.19%); 不同扰动地貌单元的田间持水量表现为 2 月弃渣堆积体 > 2 年弃渣堆积体 > 施工便道, 与坡耕地相比分别下降了 32.87%、45.69% 和 50.68%, 这表明原地貌单元(坡耕地)的供水能力(旱季)优于扰动地貌单元, 同时, 坡耕地的土壤结构为其动态蓄水(雨季)提供了有效空间。弃渣堆积体边坡容重和水分状况接近于荒草地, 饱和含水率和田间持水量较荒草地增大幅度为 1%~5%、-10%~19.8%。由此可见, 弃渣堆积体边坡具有作为绿化用土的水分条件, 堆积体平台需要配合使用保水剂才可保障绿化植物正常生长。

## 2.2 不同地貌单元的水分入渗特征

土壤水分入渗是降水、地表水转化为土壤水、地下水的关键环节, 同时也是土壤水库的主要来水方式, 其大小直接影响地表径流量和土壤侵蚀量<sup>[21]</sup>。由入渗率的时间变化曲线(图 2)可知, 不同地貌单元的土壤入渗率在初期(0~10 min)随入渗时间迅速降低, 随后入渗率下降缓慢, 最终趋于一个稳定值。人工林地的土壤入渗率在前 10 min 内由  $33.67 \text{ mm min}^{-1}$  降低至  $13.30 \text{ mm min}^{-1}$ ; 此后随着入渗过程持续, 下垫面含水率趋于饱和, 土壤入渗速率则趋于稳定 ( $6.69 \text{ mm min}^{-1}$ )。

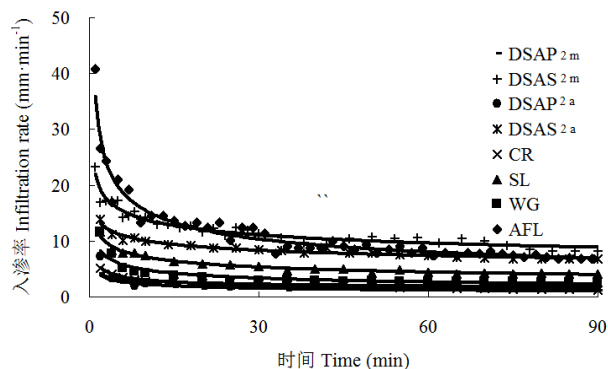


图2 不同地貌单元的入渗率随时间变化

Fig. 2 Temporal variations of soil infiltration rate relative to landform unit

土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率是分析土壤水分入渗特征的关键指标，不同地貌单元的入渗过程（表4）具有以下特征：

第一，不同地貌单元的初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率均差异显著，扰动地貌单元的入渗特征值均小于原地貌单元。扰动地貌单元的平均初始入渗率（ $10.07 \text{ mm min}^{-1}$ ）较原地貌单元（ $18.96 \text{ mm min}^{-1}$ ）降低了 13.10%，这主要由于原地貌单元的土壤初始含水率、土壤结构和孔隙度具有明显差异性。各种扰动地貌单元的稳定入渗率在  $1.13\sim 8.21 \text{ mm min}^{-1}$  之间变化，平均为  $3.87 \text{ mm min}^{-1}$ ，其变异系数（0.87）较原地貌单元提高了 87%，这充分表明城镇化建设造成项目区的土壤入渗率显著降低。而 2 月和 2 年弃渣边坡初始入渗率较荒草地分别增大 73.19%、18.48%，其稳定入渗率较最优原地貌（人工林地）分别增大了 22.72%、2.99%，这主要是弃渣边坡无压实、粗颗粒多且孔隙大，提高了土壤入渗性能；而弃渣平台受机械压实和人为整地作用，导致其紧实度高、容重大且孔隙状况差，进而土壤入渗性能降低。由此可见，弃渣堆积体作为绿化用土可较好地拦蓄径流、减缓城市内涝。

表4 不同地貌单元入渗性能指标

Table 4 Soil infiltration indices relative to landform unit

地貌单元 Landform unit	初始入渗率 Initial infiltration rate (mm min <sup>-1</sup> )	稳定入渗率 Stable infiltration rate (mm min <sup>-1</sup> )	30 min 瞬时入渗率 30 min instantaneous infiltration rate (mm min <sup>-1</sup> )	60 min 瞬时入渗率 60 min instantaneous infiltration rate (mm min <sup>-1</sup> )	平均入渗率 Average infiltration rate (mm min <sup>-1</sup> )	渗透总量 Total infiltration (cm)
DSP <sub>2m</sub>	4.10	1.13	1.41	1.19	1.48	13.30
DSS <sub>2m</sub>	20.09	8.21	11.32	9.62	10.93	98.38
DSP <sub>2a</sub>	7.22	1.98	2.04	2.04	2.21	19.92
DSS <sub>2a</sub>	13.86	6.79	8.49	7.47	8.15	73.37
CR	5.09	1.24	2.30	1.79	2.06	18.58
SL	11.60	4.07	5.43	4.41	5.20	46.77
WG	11.60	2.60	2.94	2.77	3.29	29.57
AFL	33.67	6.69	11.32	7.36	10.60	95.41

第二，各种扰动地貌单元的土壤入渗性能均存在一定差异性，其大小依次为 2 月弃渣堆积体>2 年弃渣堆积体>施工便道。2 月弃渣堆积体和 2 年弃渣堆积体的稳定入渗率分别为施工便道的 3.77 倍和 3.54 倍，而渗透总量分别为施工便道的 3 倍和 2.51 倍。2 年弃渣堆积体的稳定入渗率和渗透总量较 2 月弃渣堆积体分别下降了 6.10% 和 16.47%。由此可见，弃渣堆积体的入渗性能均随着弃渣堆弃年限延长而降低，主要是弃渣堆积体大孔隙在降水作用下会发生细颗粒不断聚集、堵塞现象，植被的恢复也使得土体结合得更加紧密，进而降低了堆积体入渗性能。

第三，弃渣堆积体平台处的入渗性能均显著小于边坡处。2 月弃渣堆积体和 2 年弃渣堆积体边坡处的

渗透总量分别为平台的 7.40 倍和 3.68 倍，2 月弃渣堆积体和 2 年弃渣堆积体平台处的入渗率在前 30 min 骤减，而后入渗率下降缓慢，表明在弃渣堆积体平台因压实作用可能存在滞水层；当入渗深度达到滞水层时，水分很难继续下渗，其稳定入渗率取决于滞水层的透水性。由于弃渣堆积体边坡处渗透总量的增加会增加弃渣堆积体饱和度，并减小弃渣颗粒间黏聚力，同时增加弃渣堆积体自重，加大弃渣堆积体边坡失稳的潜在危险性。

### 2.3 不同地貌单元的持水特征

土壤持水性能是评价不同地貌单元涵养水源和调节水分的重要指标<sup>[22]</sup>，其主要受土壤孔隙状况及土层深度影响。土壤水库总库容由死库容、兴利库容和滞洪库容 3 部分组成，它的调度主要靠土壤的蒸发、入渗和根系的吸收利用以及蒸腾来实现，可用来评价土壤持水性能。

由表 5 可见，不同扰动地貌单元的各种土壤水库特征中库容差异显著 ( $p < 0.05$ )，各种扰动地貌单元的总库容、滞洪库容和最大有效库容均表现为 2 年弃渣堆积体 > 2 月弃渣堆积体 > 施工便道。不同扰动地貌单元兴利库容由大到小依次为 2 月弃渣堆积体 ( $268.2 \text{ t hm}^{-2}$ ) > 施工便道 ( $257 \text{ t hm}^{-2}$ ) > 2 年弃渣堆积体 ( $219.0 \text{ t hm}^{-2}$ )；这是由于下垫面土壤紧实度和容重越大，土壤储存有效水分的空间容量越小，导致兴利库容大幅度下降。这种变化直接降低了土壤对植物的供水能力，使弃渣场生态修复过程中植物无法正常生长和更新。扰动地貌土壤水库具有较好的持水性能，2 月和 2 年弃渣堆积体边坡总库容分别为荒草地的 1.05 倍、1.07 倍，而最大有效库容分别为 1.06 倍、1.05 倍，表明其持水性能较好，作为城市绿化用土可有效促进绿化植物发挥调控降雨径流、减缓城市内涝的作用。

表 5 不同地貌单元的土壤水库特征

Table 5 Soil reservoir characteristics relative to landform unit

地貌单元	总库容	死库容	兴利库容	滞洪库容	最大有效库容	实际库容	水库持水效率
Landform unit	Total reservoir storage ( $\text{t hm}^{-2}$ )	Dead storage ( $\text{t hm}^{-2}$ )	Usable storage ( $\text{t hm}^{-2}$ )	Flood detention storage ( $\text{t hm}^{-2}$ )	Maximum available storage ( $\text{t hm}^{-2}$ )	Actual storage ( $\text{t hm}^{-2}$ )	Reservoir storage efficiency (%)
DSP <sub>2m</sub>	348.3±26.18c	59.5±5.57d	252.6±30.67b	36.3±13.18cd	288.8±30.77c	147.6±20.34a	42.4±2.31a
DSS <sub>2m</sub>	430.7±78.15b	65.6±8.81c	283.7±46.24ab	81.4±35.53bcd	365.1±69.44b	63.7±25.60d	14.9±5.26e
DSP <sub>2a</sub>	355.84±20.14c	62.7±3.31cd	212.6±46.15b	80.5±26.67bcd	293.1±44.19c	83.5±16.48cd	23.5±3.85cd
DSS <sub>2a</sub>	439.0±32.78 b	75.6±0.72b	225.4±135.08b	138.0±11.41ab	363.4±33.41b	89.5±28.45bc	20.3±6.21d
CR	319.5±10.67c	31.3±1.08e	257.0±24.19b	31.1±3.67cd	288.1±20.18c	149.6±20.25a	46.8±6.27a
SL	462.3±36.48b	81.1±10.48a	369.2±36.19a	12.1±5.19d	381.2±40.67b	135.5±34.61a	29.3±5.16b
WG	409.4±30.95b	63.8±6.19cd	250.2±48.16b	95.4±3.98bc	345.6±33.19b	108.8±20.14b	26.6±4.91bc
AFL	546.1±55.19a	67.2±19.34c	283.9±60.18ab	195.0±8.17a	478.9±70.46a	139.9±20.36a	25.6±9.14bc

### 2.4 城市绿地的土壤重构类型

弃渣堆积体是城镇建设项目区的主要扰动地貌单元，这既是项目区主要的绿化用地，也是城市绿地建设客土来源，但需要采用恢复土层和培肥改良工艺进行土壤重构，使其具有最优土壤物理、化学和生物条件以促进植物生长、恢复土壤生产力<sup>[23]</sup>，发挥绿地拦蓄径流、减缓城市内涝的作用。通过工程重构和生物重构两种方式，可使重构土壤保持土层发生顺序基本不变，土壤质量更适宜植物生长；工程重构侧重对弃土弃渣进行剥离、回填、挖填、覆土和平整，生物重构侧重对重构“土壤”的培肥改良和种植措施。相关研究认为，各种生产建设项目区的重构土壤质量受土壤砾石、养分含量和容重影响较大，大量砾石存在会导致其颗粒离散程度增大、土壤结构变差<sup>[24]</sup>，养分匮乏导致重构土壤上的植被生长缓慢<sup>[16]</sup>。土壤重构遵循“分层剥离，交错回填”的基本原理<sup>[25]</sup>，重构土壤工艺因不同利用方向存在差异<sup>[16]</sup>。本文根据紫色丘陵区自然土壤发生特征，基于各种扰动地貌与原地貌单元土壤理化性质及水文特性的差异性，提出了 3 种城市绿地土壤重构类型（图 3），同时采取相应培肥改良措施提高各种重构土壤类型对乔、灌、草的适宜性水平。

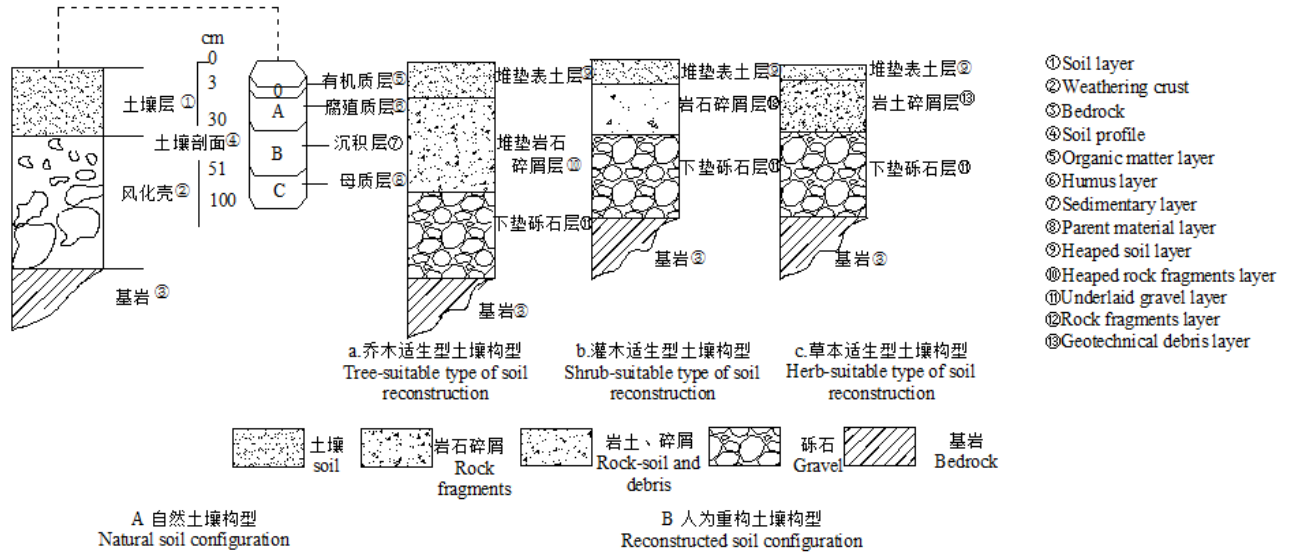


图3 城市绿地土壤重构类型

Fig.3 Soil reconstruction types for urban green space

**2.4.1 乔木适生型土壤构型** 调查表明,当地乔木适生土壤生境可概括为:有效土层(能生长植物的实际土层)厚度大于80 cm,土壤容重 $0.9\sim 1.48\text{ g cm}^{-3}$ ,总孔隙度 $36.45\%\sim 56.82\%$ ,田间持水量 $10.69\%\sim 27.13\%$ ,有机质含量大于 $32.92\text{ g kg}^{-1}$ ,氮(N)、磷(P)、钾(K)含量分别大于 $0.82\text{ g kg}^{-1}$ 、 $1.66\text{ g kg}^{-1}$ 、 $4.18\text{ g kg}^{-1}$ 。黄葛树(*Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner)能抗大气污染,耐瘠薄,在石山(砂页岩、花岗岩或石灰岩形成)、城市建筑废墟、工厂矿区均可栽植且生长良好,也是重庆城市园林绿化的优良乔木。相关研究表明,当土层厚度大于10 cm时其对植物生长的促进作用不明显<sup>[26]</sup>; <2 cm砾石含量在5%~10%范围内变化既可提高乔木适生型土壤通气、透水能力,又可提高土壤持水性能和土壤绝对含水量;80 cm堆垫表土层适合黄葛树乔木生长;在土壤中掺入腐叶土和种植固氮草本可明显提高土壤养分水平。

项目区弃渣堆积体存在砾石化严重(42.43%~74.76%)、容重大( $1.49\sim 1.59\text{ g cm}^{-3}$ )和有机质含量低( $2.87\sim 11.45\text{ g kg}^{-1}$ )等妨碍植物正常生长的障碍因素。与乔木适宜土壤特性相比,其砾石含量和容重分别增加10.99%~16.23%、4.05%~17.56%,而其有机质含量降低了65.19%;弃土弃渣土壤总库容和有效库容也较低,易导致乔木生长受季节性干旱胁迫。2年弃渣边坡砾石含量最低,且有机质含量较人工林地增加2%,因此,2年弃渣边坡土壤可作为乔木适生型土壤的表土。堆渣体平台和施工便道可分离出大量砾石下垫底层,岩石碎屑加在表土下方利于乔木根系伸展。落叶乔木采用配土栽植,常绿树种则带土球移植,同时覆盖80 cm疏松表土,并配合使用树脂型钾盐保水剂提高其抵御季节性干旱胁迫的能力,这些措施可充分保证乔木正常生长。

**2.4.2 灌木适生型土壤构型** 调查表明,当地灌木适生土壤生境可概括为:有效土层40~80 cm,土壤容重 $0.9\sim 1.36\text{ g cm}^{-3}$ ,总孔隙度 $47.14\%\sim 66.59\%$ ,田间持水量 $16.15\%\sim 23.16\%$ ,有机质含量高于 $38.18\text{ g kg}^{-1}$ ,N、P、K含量分别大于 $2.85\text{ g kg}^{-1}$ 、 $3.25\text{ g kg}^{-1}$ 、 $4.37\text{ g kg}^{-1}$ 。根据重构土体类型选择适宜或抗逆性强的树种,是解决绿化树生长问题的首要考虑因素。红继木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)适应性强,耐旱、耐瘠薄,萌芽力和发枝力强,是城市园林绿化的优良灌木。红继木所需土层厚度不高,<1 cm砾石含量在2%~5%范围内可提高土壤持水性能,可施用苜蓿(*Medicago*)等绿肥改善重构土体养分贫乏状况,有效促进灌木生长以充分发挥其减缓城市内涝的潜在作用。

项目区存在砾石含量高、容重大和有机质匮乏等障碍因子,与灌木适宜土壤特性相比,其砾石含量和容重分别高25.99%~41.23%、5.62%~19.78%,而其有机质含量低75.19%~96.34%。扰动地貌因砾石、岩石碎屑及生土含量显著高于人工林地,导致其持水性能显著下降且土壤有机质含量极低,不利于灌木正常生长且极易受干旱胁迫。因此,对于灌木适生型土壤构型而言,灌木采取配土栽植,岩石碎屑层堆垫厚度应低于乔木适生型,同时覆盖40 cm疏松表土,并使用树脂型钠盐保水剂提高其抗旱能力,可充分保证灌木



正常生长。

**2.4.3 草本适生型土壤构型** 调查表明, 当地草本适生土壤生境可概括为: 有效土层 10~30 cm, 土壤容重 0.9~1.21 g cm<sup>-3</sup>, 总孔隙度 37.85%~44.37%, 自然含水量 12.16%~17.85%, 有机质含量大于 37.85 g kg<sup>-1</sup>, N、P、K 含量分别大于 0.79 g kg<sup>-1</sup>、1.48 g kg<sup>-1</sup>、3.89 g kg<sup>-1</sup>。麦冬 (*Ophiopogon japonicus*) 抗性强, 耐瘠薄, 喜排水良好的土壤, 常用做城市道路绿化草本。弃渣堆积体的生土和砾石含量较多, 土壤容重较大, 覆盖表土时应疏松土壤使其容重小于 1.21 g cm<sup>-3</sup>; 同时施加有机肥改善土壤养分状况; <1 cm 砾石含量在 2%~5 % 范围内可显著促进草本土壤发挥调控径流的作用。

与草本适宜土壤特性相比, 项目区堆积体砾石含量和容重分别高 25.99%~41.23%、8.65%~20.37%, 而其有机质含量低 85.19%~96.34%。扰动地貌弃渣砾石含量显著高于荒草地, 导致其水库持水效率显著降低, 草本生长易受干旱胁迫; 弃渣边坡容重与荒草地差异较小, 可用作草本适生土壤的表土。因此, 对于重构草本适生型土壤, 表土层需下垫一定厚度的岩石碎屑土; 同时使用高分子量聚丙烯酰胺类保水剂 (PAM) 可提高草本植物抵御季节性干旱的性能; 采用蘸泥浆或拌土播撒种植<sup>[27]</sup>, 同时覆盖 10 cm 肥沃表土, 可充分保证草本植物正常生长。

### 3 讨论

#### 3.1 不同地貌单元的土壤水库作用

土壤水库具有蓄存和调节水分的功能, 不仅能供给植物生长所需有效水分, 而且具有调节地表—土壤水循环的功能。研究表明, 不同土地利用类型对降水的截留和分配程度存在差异, 其中, 农地、荒草地的充水量(渗入土壤中的降水)分别占同期降水量 463 mm 的 94.3%和 92.6%, 而林地(刺槐)可占 77.9%<sup>[28]</sup>。当土层厚度一定时, 土壤容重变大会使土壤孔隙数量、大小减小, 尤其是土壤中对贮存水分起重要作用的大孔隙(直径  $d > 1$  mm)<sup>[29]</sup>; 当土壤容重由 1.074 g cm<sup>-3</sup> 增大至 1.519 g cm<sup>-3</sup> 时, 土壤饱和含水量、田间持水量和凋萎含水量分别下降 19.2%、17.5%和 10.3%<sup>[30]</sup>。研究表明, 土壤孔隙大小、数量和分布对土壤水库的蓄水特性具有重要作用, 当土壤孔隙度降低 10%时, 饱和含水量降低 10%<sup>[31]</sup>。本研究中, 各扰动地貌单元土壤容重较原地貌单元显著增加 ( $p < 0.05$ ), 其中, 2 月弃渣堆积体、2 年弃渣堆积体和施工便道容重分别较原地貌增加了 13.4%、17.9%和 29.9%, 这使得其土壤水库总库显著降低。土壤水库储水量因受降水入渗和蒸散发影响而具有明显的季节变化特征, 今后应加强不同地貌单元土壤水库在雨季的动态变化特征研究, 为合理利用土壤水资源、园林植被建设和地表洪水调控提供科学依据。

#### 3.2 城市下垫面特征与洪涝相关性

下垫面条件改变是造成城市内涝灾害频发和季节性干旱等问题的重要原因。相关研究表明, 城市化发展会导致在城区暴雨形成的水文过程线出现峰高、量大的现象<sup>[32]</sup>, 当城市化由 12.6%增大至 100%时,  $P$ (洪峰频率) = 5%的洪峰流量增大为原来的 1.39 倍, 涨峰历时由 382 min 缩短至 89 min<sup>[3]</sup>。研究表明, 我国城镇建设中形成的下垫面包括具有不同渗透能力的草地、土地面、红砖、混泥土方砖、旧沥青路面、新沥青路面等<sup>[1]</sup>。北京市房地产建设主要形成不透水建筑物屋顶、硬化地面、透水型地面和绿地 4 种下垫面, 分别占项目区面积的 24%、22.8%、28.2%和 25%, 径流系数分别为 0.95, 0.90, 0.45, 0.15<sup>[33]</sup>。不同城镇建设项目绿地率存在一定差异性(表 6), 改、扩建城镇主次干道以及新建城镇的次干道绿地率相对较低, 而新建开发建设项目绿地率高达 35%, 因此, 要充分控制和优化项目区绿化用地的比例。

表 6 不同城镇建设项目绿地率

Table 6 Ratio of green space relative to urban construction project

项目类型 Project types	绿地率 Green space ratio (%)	硬化率 Ground hardening rate (%)	洪涝灾害次数 The number of floods	径流曲线数 CN 值 <sup>1)</sup> CN values in Soil conservation service (SCS) model
-----------------------	---------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	---

旧城改造 <sup>①</sup>	20	80	1~5	90~95
房地产建设 <sup>②</sup>	30~35	65~70	1~2	60~87
新城镇道路建设 <sup>③</sup>	20~30	70~80	1~3	92~94
老城镇道路建设 <sup>④</sup>	15~20	80~85	1~5	93~95

注: 1) CN 是用来反映下垫面条件对产汇流过程影响的无量纲参数 Note: CN ranges from 0 to 100, reflecting the dimensionless parameter of the effect of the underlying layer on pooling process. ①Old city reconstruction; ②Real estate construction; ③New urban road construction; ④Old urban road construction

相关研究表明, 植被覆盖区 5%~15% 的降水会形成地表有效径流, 非植被覆盖的水泥地面约有 60% 的降水会形成径流<sup>[34]</sup>。林草植被减流作用均会经历“完全不减流—部分减流—减流”过程, 3 a 生乔木减流率高达 57.4%~64.3%<sup>[35]</sup>, 覆盖度为 63%~70% 的 2 a 生灌木(紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.) 可减少 59.4%~81.9% 径流量<sup>[36]</sup>, 草本(紫花苜蓿 *Medicago sativa*.) 在种植 4 个月后, 径流量减少 52%~79%<sup>[37]</sup>。城市化过程中, 草坪因人为挖土和压实导致入渗性能降低、径流增加<sup>[38]</sup>, 随着扰动土恢复时间的延长, 其渗透性能提高, 重构土壤渗透性与土壤质地、容重和坡度显著相关<sup>[26]</sup>。林草地可拦蓄 50%~70% 降水量的特性, 对于洪水灾害而言具有重要意义, 因此, 增加城市绿地是减少城市内涝的重要途径。本文调查表明, 草本植物在短期内调节地表径流作用明显, 而乔灌木调节降雨—径流则随林木生长周期更为突出, 因此, 在城市绿地建设中应注重乔灌木适生型土壤重构类型。项目区三种土壤重构类型可保证草本植物在定植后 2 个月、乔灌木在定植后 4~5 个月左右充分发挥其调控地表径流、缓解城市内涝的潜在作用。由于城镇建设中各种下垫面类型及水文特性差异较大, 使得弃土弃渣堆积体土壤重构和性能恢复问题更为复杂; 在后期可借鉴矿区土地复垦工艺, 优化城市绿地土壤构型、提高重构土壤质量, 为缓解城市内涝和城市生态环境改善提供科学依据。

## 4 结论

扰动地貌单元的土壤理化性质不同于原地貌单元, 扰动地貌单元的土壤容重 ( $1.59 \text{ g cm}^{-3}$ ) 均大于原地貌单元 ( $1.38 \text{ g cm}^{-3}$ ), 而土壤田间持水量变化趋势则与土壤容重相反, 2 月弃渣堆积体最大 (22.51%), 施工便道最小 (16.57%)。各种扰动地貌单元的土壤入渗性能均显著小于原地貌单元, 其稳定入渗率依次为 2 月弃渣堆积体 ( $4.46 \text{ mm min}^{-1}$ ) > 2 年弃渣堆积体 ( $4.39 \text{ mm min}^{-1}$ ) > 施工便道 ( $1.24 \text{ mm min}^{-1}$ ), 原地貌中人工林地最大 ( $6.69 \text{ mm min}^{-1}$ ), 荒草地最小 ( $2.60 \text{ mm min}^{-1}$ )。各种地貌单元的土壤兴利库容差异显著, 扰动地貌单元的土壤兴利库容较原地貌单元 ( $301.1 \text{ t hm}^{-2}$ ) 降低了 18.21%, 其大小依次为 2 月弃渣堆积体 ( $268.2 \text{ t hm}^{-2}$ ) > 施工便道 ( $257.0 \text{ t hm}^{-2}$ ) > 2 年弃渣堆积体 ( $219.0 \text{ t hm}^{-2}$ ); 原地貌单元的兴利库容则表现为坡耕地 ( $369.2 \text{ t hm}^{-2}$ ) > 人工林地 ( $283.9 \text{ t hm}^{-2}$ ) > 荒草地 ( $250.2 \text{ t hm}^{-2}$ )。弃渣堆积体可作为城市绿化用地和绿地建设客土来源, 通过工程重构和生物重构可形成乔木适生型、灌木适生型和草本适生型土壤构型, 这种重构土壤类型可保证草本植物在定植后 2 个月、乔灌木在定植后 4~5 个月左右发挥其调控地表径流、缓解城市内涝的潜在作用。

## 参考文献

- [1] 王紫雯, 程伟平. 城市水涝灾害的生态机理分析和思考——以杭州市为主要研究对象. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 582-587  
Wang Z W, Cheng W P. Analysis of ecological mechanism of urban flood and waterlog—Research based mainly on Hangzhou City (In Chinese). Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2002, 36(5): 582-587
- [2] 甘枝茂, 孙虎, 甘锐. 黄土高原地区城郊型侵蚀环境及其特征. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 39-43, 50

- Gan Z M, Sun H, Gan R. Eroded environment of suburb-type and its characteristics of Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(2): 39-43, 50
- [3] 赵纯勇, 杨华, 孔德树. 南方山地丘陵城市水土流失及对策研究. *中国水土保持*, 2002(6): 28-29  
Zhao C Y, Yang H, Kong D S. Study on soil and water loss and countermeasures of hilly cities in the South China (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2002(6): 28-29
- [4] 倪含斌, 张丽萍. 神东矿区堆积弃土坡地入渗规律试验研究. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 28-31  
Ni H B, Zhang L P. Experimental study on slope infiltration process in abandoned soils in Shen-Dong mine region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 28-31
- [5] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究. *岩土工程学报*, 2006, 28(9): 1134-1138  
Zhou Z, Fu H L, Liu B C, et al. Orthogonal tests on permeability of soil-rock-mixture (In Chinese). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(9):1134-1138
- [6] 杨金玲, 张甘霖. 城市“土壤水库”库容的萎缩及其环境效应. *土壤*, 2008, 40(6): 992-996  
Yang J L, Zhang G L. Loss of soil water capacity in urban areas and it's impacts on environment (In Chinese). *Soils*, 2008, 40(6): 992-996
- [7] 孙厚才, 尤伟. 川东紫色土及母质水理性研究. *人民长江*, 2012, 43(1): 72-75  
Sun H C, You W. Research on water physical property of purple soil and parent material in eastern Sichuan (In Chinese). *Yangtze River*, 2012, 43(1):72-75
- [8] Albaladejo J, Castillo V, Díaz E. Soil loss and runoff on semiarid land as amended with urban solid refuse. *Land Degradation & Development*, 2015, 11(4): 363-373
- [9] Nadal-Romero E, Cortesi N, González-Hidalgo J C. Weather types, runoff and sediment yield in a Mediterranean mountain landscape. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2013, 39(4): 427-437
- [10] Peng X, Shi D, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Catena*, 2014, 123: 215-224
- [11] Zope P E, Eldho T I, Jothiprakash V. Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: A case study of Mumbai City, India. *Natural Hazards*, 2015, 75(1): 887-908
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [13] Wuest S B. Bias in ponded infiltration estimates due to sample volume and shape. *Vadose Zone Journal*, 2005, 4(4): 1183-1190
- [14] 史培军, 袁艺, 陈晋, 等. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. *生态学报*, 2001, 21(7): 1041-1049  
Shi P J, Yuan Y, Chen J, et al. The effect of land use on runoff in Shenzhen City of China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1041-1049
- [15] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性. *生态学报*, 2011, 31(8): 2331-2340  
Liu J, Li X W, Ji Z H, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2331-2340
- [16] 孟秦倩, 王健, 吴发启. 延安丘陵沟壑区坡面果园土壤水库特征. *灌溉排水学报*, 2008, 27(1): 93-95  
Meng Q Q, Wang J, Wu F Q. Characteristics of slope-orchard soil reservoir in Yanan Loess Hilly Region (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(1): 93-95
- [17] 马维伟, 王辉, 王修华, 等. 甘南杂海不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能. *水土保持学报*, 2012, 26(4):194-198

- Ma W W, Wang H, Wang X H, et al. Soil physical characteristics and water conservation function for four main wetland types in Gahai of Gannan (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 194-198
- [18] Mcbratney A B, Bishop T F A, Teliatnikov I S. Two soil profile reconstruction techniques. *Geoderma*, 2000, 97(3): 209-221
- [19] 油新华. 土石混合体的随机结构模型及其应用研究. 北京: 北方交通大学, 2001
- You X H. Stochastic structural model of the earth-rock aggregate and its application (In Chinese). Beijing: Northern Jiaotong University, 2001
- [20] 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(1): 58-67
- [21] 任利东, 黄明斌, 樊军. 同类型层状土壤持水能力的研究. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 105-111
- Ren L D, Huang M B, Fan J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 105-111
- [22] Verhulst N, Nelissen V, Jespers N, et al. Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. *Plant and Soil*, 2011, 344(1/2):73-85
- [23] Waston J W. Reclaiming disturbed land for forestry. *Arboricultural Journal*, 2004, 28: 117-120
- [24] 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 230-238
- Wang J M, Zhang M, Bai Z K, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(4): 230-238
- [25] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法. *土壤*, 2005, 37(1): 8-12
- Hu Z Q, Wei Z Y, Qin P. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(1): 8-12
- [26] Holmes P M, Richardson D M. Protocols for restoration based on recruitment dynamics, community structure, and ecosystem function: Perspectives from South African fynbos. *Restoration Ecology*, 1999, 7(3): 215-230
- [27] Jorgensen D W, Gardner T W. Infiltration capacity of disturbed soils: Temporal change and lithologic control. *Journal of the American Water Resources Association*, 1987, 23(6): 1161-1172
- [28] 王力, 卫三平, 王全九. 黄土丘陵区燕沟流域农林草地土壤水库充失水过程模拟. *林业科学*, 2011, 47(1): 29-35
- Wang L, Wei S P, Wang Q J. Simulation of soil moisture dynamics under farmland, woodland and grassland in Yangou small watershed of the hill-gully region of the Loess Plateau (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(1): 29-35
- [29] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macropores in soil by computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(3): 653-660
- [30] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. *土壤学报*, 2010, 47(4): 611-620
- Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 611-620
- [31] 王卫华, 王全九, 樊军. 原状土与扰动土导气率、导水率与含水率的关系. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 25-29
- Wang W H, Wang Q J, Fan J. Relationship between air permeability, water conductivity and water content for undisturbed and disturbed soils (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8): 25-29
- [32] Mills A, Fey M, Donaldson J, et al. Soil infiltrability as a driver of plant cover and species richness in the semi-arid Karoo, South Africa. *Plant and Soil*, 2009, 320(1/2): 321-332

- [33] 王国, 王冬梅, 孟岩, 等. 北京市房地产项目雨水径流的研究. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 112-116  
Wang G, Wang D M, Meng Y, et al. Research on rainwater runoff from real estate project in Beijing (In Chinese). South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2013, 11(2):112-116
- [34] 蔡开玺. 南京市消纳城市洪涝灾害的多元化途径. 陕西水利, 2012(3):115-116  
Cai K X. Characteristics of flooding disaster in Nanjing City (In Chinese). Shaanxi Water Conservancy, 2012(3): 115-116
- [35] 蒋荣, 张兴奇, 张科利, 等. 喀斯特地区不同林草植被的减流减沙作用. 水土保持通报, 2013, 33(1):18-22  
Jiang R, Zhang X Q, Zhang K L, et al. Runoff and sediment reduction effects under different forest and grass vegetation in a Karst Area (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1):18-22
- [36] 肖培青, 姚文艺, 王昌高. 灌木减流减沙效应及其水力学机理试验研究. 泥沙研究, 2012(5): 33-37  
Xiao P Q, Yao W Y, Wang C G. Experimental study of effect of shrubs on runoff and sediment reduction and its hydrodynamic mechanism (In Chinese). Journal of Sediment Research, 2012(5): 33-37
- [37] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 草被减流减沙效应及其力学机制分析. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 15-19  
Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Reduction effects of grass on runoff and sediment and its mechanical mechanism (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(2): 15-19
- [38] Woltemade C J. Impact of residential soil disturbance on infiltration rate and stormwater runoff. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(4):700 - 711

## Hydrological Characteristics and Soil Reconstruction of Different Landform

### Units as Affected by Urbanization Process in Purple Hilly Area

LOU Yibao<sup>1</sup> SHI Dongmei<sup>1†</sup> JIANG Ping<sup>2</sup> LI Yexin<sup>3</sup> LIN Zi<sup>1</sup> PU Jing<sup>1</sup>

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources Electric Power and Architecture, Chongqing 400020, China)

(3 College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract** 【Objective】Urbanization absolutely needs activities like excavating, land-filling and road paving during its process, thus generating a variety of disturbed landform units, among which the dumping of waste soil is the main soil source supplying the construction of urban greenbelts with alien soil. Consequently, the disturbed landform units join together with native landform units forming a complex underlying in the area of a urbanization construction project.

【Method】In this paper, by means of field investigation and laboratory tests, a system comparison was made of the various landform units in material composition, water infiltration and water holding capacity, and then discussions were carried out on three types of reconstructed urban soil and their potential roles in mitigating the risk of urban water logging.

【Result】Results show: (1) Soil bulk density differed significantly ( $p < 0.05$ ) between the landform units and varied in the order of Construction makeshift road ( $1.74 \text{ g cm}^{-3}$ ) > 2-year piles of dumped waste soil ( $1.58 \text{ g cm}^{-3}$ ) > 2-month piles of dumped waste soil ( $1.52 \text{ g cm}^{-3}$ ) > Waste grassland ( $1.47 \text{ g cm}^{-3}$ ) > Cultivated sloping land ( $1.34 \text{ g cm}^{-3}$ ) > Artificial forest land ( $1.32 \text{ g cm}^{-3}$ ). In the piles of dumped waste soil, soil bulk density was higher on their flat tops than on their side slopes; (2) Soil infiltration rate varied in the order of side slopes of the piles of dumped waste soil > native landform > flat tops of the piles of dumped waste soil; stable infiltration rate on flat tops of the piles varied too with compactness of its surface layer, thus exposing it to the risk of forming of an aquitard; (3) Water storage capacity differed sharply from landform unit to landform unit ( $p < 0.05$ ), and was generally lower in reconstructed

<http://pedologica.issas.ac.cn>

landform units ( $378.7 \text{ t hm}^{-2}$ ) than native ones ( $472.6 \text{ t hm}^{-2}$ ); it varied in the order of: 2-year piles > 2-month piles > Construction makeshift road, for disturbed landform units and in the order of Artificial forest land > Cultivated slopeland > Waste grassland for native landform units; and (4) For urban green land, soil reconstruction was usually done in three types, that is, tree-suitable, shrub-suitable and herb-suitable, and thickness bulk density, gravel content (<2 cm) and organic matter content were the main factors determining soil quality of the reconstructed soils. Soils reconstructed in line with the three types (herb-suitable, shrub-suitable and tree-suitable) may ensure the revegetation successful and capable of playing its potential role in regulating surface runoff and mitigating the risk of urban waterlogging, 2 months after plantation for herbs and 4~5 months for trees and shrubs. **【Conclusion】** All the findings in this study may provide certain scientific support for soil reconstruction for urban green belts and land and management of urban waterlogging during the process of urbanization in the Three-Gorge Reservoir Area.

**Key words** Landform units; Infiltration capacity; Water-holding capability; Soil reconstruction; Urbanization; Purple hilly area

(责任编辑: 陈荣府)