

城市绿地不同植被群落对表层土壤入渗的影响

冯 艳, 谢栋博, 陈军洲, 董娜林, 雷雅凯, 贺 丹*

(河南农业大学 风景园林与艺术学院, 河南 郑州 450002)

摘 要:为探索郑州市城市不同植被群落对绿地表层土壤入渗的影响,以郑州市城区 13 种不同绿地表层土壤为对象,通过测定土壤物理性质及土壤饱和导水率,探讨了土壤物理性质对土壤入渗的影响。结果表明:1)不同绿地表层土壤的物理性质差别较大,乔灌木混合配置的绿地比单一种植的绿地理化性质更好,且土壤的物理理化性质易受到人为踩踏等因素的影响。2)不同绿地表层土壤水分入渗性能与持水能力差异显著,乔灌木混合配置的绿地比单一种植的绿地入渗性能和持水能力好,表现为较高的饱和导水率和田间持水量,其中银杏-麦冬配置的绿地饱和导水率最高,西府海棠-沿阶草配置的绿地饱和导水率最小;大叶黄杨单作绿地的田间持水能力最强,西府海棠-沿阶草配置的绿地田间持水能力最弱。3)土壤饱和导水率与总孔隙度呈极显著正相关关系,其中非毛管孔隙度与毛管孔隙度呈显著正相关关系。土壤饱和导水率与容重呈极显著负相关关系;田间持水量与土壤总孔隙度呈显著正相关。城市绿地建设采用乔灌木混合配置的形式,能有效提高绿地土壤的入渗能力和持水能力,降低城市内涝风险。

关键词:城市绿地;土壤入渗;植被群落;饱和导水率;田间持水量

中图分类号:S731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0267-06

Effects of Different Vegetation Communities on Infiltration of Surface Soil in Urban Green Space

FENG Yan, XIE Dong-bo, CHEN Jun-zhou, DONG Na-lin, LEI Ya-kai, HE Dan*

(College of Landscape Architecture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: In order to explore the influences of different vegetation communities on the surface soil infiltration in urban green spaces of Zhengzhou City, 13 different green land surface soils were collected to measure the soil physical properties and saturated hydraulic conductivity and to discuss the effects of soil physical properties on soil infiltration. The results showed that 1) the physicochemical properties of the green space mixed with trees, shrubs and grasses were better than those with single planting green space. The physicochemical properties of the soil were easily affected by human trampling and other factors. 2) The infiltration and water holding capacity of the surface soil of different vegetation communities were significantly different. The infiltration and water holding capacity of arbor, shrub and grass were better than those of single planting, which showed higher saturated water carrying capacity and field water holding capacity. Among them, the green space *Ginkgo biloba-Ophiopogon japonicus* had the highest saturated hydraulic conductivity, while *Malus micromalus-Ophiopogon bodinieri* had the lowest saturated hydraulic conductivity. The field capacity of *Euonymus japonicus* monoculture green space was the strongest, and the field capacity of *M. micromalus-O. bodinieri* was the weakest. 3) Soil saturated hydraulic conductivity was positively correlated with total porosity, while non-capillary porosity was positively correlated with capil-

收稿日期:2020-06-24 修回日期:2020-07-17
基金项目:国家自然科学基金(31600579)。
作者简介:冯 艳,博士,讲师。研究方向:城市景观生态。E-mail:fengyan@henau.edu.cn
* 通信作者:贺 丹,博士,副教授。研究方向:风景园林景观生态。E-mail:dandan990111@163.com

lary porosity. Soil saturated hydraulic conductivity was negatively correlated with bulk density, and field capacity was positively correlated with soil total porosity. It was suggested that urban green space construction should adopt the mixed planting form with trees, shrubs and grass, which can effectively improve the infiltration capacity and water holding capacity of the green land soil and reduce the risk of urban waterlogging.

Key words: urban green space; soil infiltration; vegetation community; saturated hydraulic conductivity; field capacity

随着中国城市化快速发展,城市绿地发挥着多方面的生态功能,对城市环境、景观和居民的休闲具有积极作用^[1-3]。城市绿地土壤不仅能够为园林植物的生长提供必需的介质和养分,还能涵养水源,减少城市降雨造成的瞬时洪涝灾害^[4]。而随着城市的建设,城市的不透水路面增加了城市的地表径流,导致城市内涝问题凸显^[5]。相关研究发现城市绿地能够通过土壤入渗缓解城市内涝问题,消减雨洪和补给地下水、净化污染物以及影响植物的生长^[6-9]。在城市绿地形式中,下凹式绿地拥有较好的入渗性能和保水能力^[10]。而绿地土壤入渗性能和保水能力除受土壤自身的理化性质和绿地结构形式等因素影响之外,还受到植物生长的影响,不同植被群落的绿地土壤涵养水源能力差异显著^[11]。

土壤对于降雨的调节,主要通过土壤对于水分的人渗和保持来实现,一般用饱和导水率来表示土壤入渗能力的强弱^[12-13]。以往城市绿地的研究主要集中在土壤养分和污染方面,对于土壤入渗和水分保持方面的研究较少^[14-16]。近年来郑州市城市建设速度加快,城市地表硬化、不合理的绿地建设及城市排水管

网的不畅等问题,导致城市内涝问题严重^[17]。本研究以郑州市公园绿地为对象,研究不同植被群落表层土壤的物理性质和水分特征,并探讨了影响城市绿地土壤水分入渗和水分保持性能的影响因子,为郑州市绿地建设和绿地土壤改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

郑州地处中原,位于中国的中北部(112°42′—114°14′E,34°16′—34°58′N),地处黄河中下游和伏牛山脉东北翼向黄淮平原过渡的交接地带,属于典型的暖温带大陆性气候,四季分明,年平均降水量 640.9 mm,降雨集中在夏季,突变现象发生的频次较大,导致郑州市极易在夏季出现洪涝灾害^[18]。主要土壤类型为潮土,公园绿地植被群落类型主要为乔灌草、乔灌、乔草、灌草、草地等。为了减少土壤原始属性和植被群落的生长年限差异对研究结果的影响,以具有代表性碧沙岗公园为研究对象,选取其中的不同植被群落类型进行采样,共选取了 13 种不同植物搭配模式(样地土壤类型大致相同),基本情况见表 1。

表 1 样地情况

Table 1 Information of the sampling plots

样地号	群落类型	主要植物种
1	乔灌草	北美鹅掌楸-金钟花-结缕草(<i>Liriodendron tulipifera</i> - <i>Forsythia viridissima</i> - <i>Zoysia japonica</i>)
2		侧柏-洒金桃叶珊瑚-麦冬(<i>Platycladus orientalis</i> - <i>Aucuba japonica</i> var. <i>variegata</i> - <i>Ophiopogon japonicus</i>)
3		侧柏-槭棠-麦冬(<i>P. orientalis</i> - <i>Kerria japonica</i> - <i>O. japonicus</i>)
4	乔灌	荷花玉兰-南天竹(<i>Magnolia grandiflora</i> - <i>Nandina domestica</i>)
5		侧柏-南天竹
6	乔草	银杏-麦冬(<i>Ginkgo biloba</i> - <i>O. japonicus</i>)
7		西府海棠-沿阶草(<i>Malus × micromalus</i> - <i>Ophiopogon bodinieri</i>)
8		侧柏-麦冬
9	草	麦冬
10		狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>)
11	灌木	牡丹(<i>Paeonia suffruticosa</i>)
12		月季花(<i>Rosa chinensis</i>)
13		大叶黄杨(<i>Euonymus japonicus</i>)

为减少原始土壤属性差异对研究结果的影响,且考虑到表层土壤受植被生长、人为践踏和翻耕的影响,为了得到更加准确的水分入渗结果,将取样深度确定为地表 0~10 cm。于 2019 年 10 月用 100

cm³的环刀分别采集上述 13 个样点的原状土样,每样点取 5 个重复,用于饱和导水率(K_s)的测定;重复采样用于土壤含水量、土壤孔隙度、土壤容重、土壤持水量的计算。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤理化性质测定 根据《土壤物理性质测定法》^[19],土壤自然含水量采用烘干法测定,土壤容重、土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度、土壤总孔隙度均采用环刀法测定(备注:D土壤密度/土壤比重采用常用密度值,2.65 g·cm⁻³),具体方法如下。

土壤自然含水量的测定:

采用土壤剖面取样方式进行取样,置于培养皿中用恒温烘箱(温度设置为105℃)烘干6 h,共做3个重复。计算公式如下:

土壤自然含水量=

$$\frac{(\text{湿土重} + \text{培养皿重}) - (\text{干土重} + \text{培养皿重})}{(\text{干土重} + \text{培养皿重}) - \text{培养皿重}} \times 100\% \tag{1}$$

土壤物理性质及饱和导水率测量方法如下:

毛管孔隙度/%=

$$\frac{\text{吸水2 h左右带土环刀重/g} - \text{一环刀重/g} - \text{一环刀内干土重/g}}{\text{环刀体积/cm}^3} \times 100 \tag{5}$$

非毛管孔隙度/%=总孔隙度-毛管孔隙度 (6)

田间持水量/(cm³·cm⁻³)=

$$\frac{100 \times \text{毛管孔隙度}}{\text{环刀内干土重}} \tag{7}$$

1.2.2 土壤饱和导水率的测定 采用环刀法测定土壤饱和导水率,土壤入渗过程中,将入渗开始后1 min的入渗速度作为初始入渗率,本试验取前5 min的平均入渗速率作为初始入渗率,试验时向上部环刀加水,保持水面低于上部环刀口1 mm,即环刀内5 cm的水量,每隔2 min记1次数据,直到4个单位时间内渗透出的水量相等,数值不在下降时的入渗速率即为稳定入渗率,重复3次求平均值。

渗透速率(V)V/(mm·min⁻¹)=

$$\frac{10 \times Q_n}{t_n S} \tag{8}$$

式中:Q_n为相邻两次间隔内所渗透的水量/mL;t_n为相邻两次渗透所间隔的时间/min;S为渗透筒的横断面积/cm²。

饱和导水率 K_t/(mm·min⁻¹)=V×

$$\frac{L}{L+h} \tag{9}$$

式中:K_t为温度为t时的渗透系数/(mm·min⁻¹);L为土层厚度/cm;h为水层厚度/cm。

1.3 数据处理

利用Excel 2016、IBM SPSS Statistics 26 软件进行试验数据的统计分析与作图。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

不同样地的植被群落土壤物理性质差异极显著,对土壤容重(F=19.964,P<0.01)、总孔隙度(F=19.964,P<0.01)、毛管孔隙度(F=73.740,

取样前测量环刀自身的净重及环刀体积,清理样地上方杂物,将干净的环刀打入土壤剖面(垂直打入,不要晃动)。环刀取出时,将底部削平,并在上下垫上滤纸膜后迅速称重(得自然土重+环刀重)。将环刀置于2~3 mm水层的磁盘中做浸水处理,浸水时保留上层滤膜,2 h后取出环刀,去除多余水分后称重(得吸水2 h带土环刀重)。土壤各物理指标计算公式如下:

环刀内干土重/g=

$$\frac{(\text{自然土重} + \text{环刀重}) - \text{一环刀重}}{\text{土壤自然含水量} + 1} \tag{2}$$

容重/(g·cm⁻³)=

$$\frac{M(\text{环刀内干土重})}{\text{环刀体积}} \tag{3}$$

总孔隙度/%=(1-

$$\frac{\text{容重}}{\text{比重}}) \times 100 \tag{4}$$

P<0.01)和非毛管孔隙度(F=24.100,P<0.01)的影响具有统计学意义。绿地土壤容重为1.09~1.50 g·cm⁻³,其中西府海棠-沿阶草、侧柏-麦冬、牡丹的土壤容重较大,为1.40~1.50 g·cm⁻³;银杏-麦冬土壤容重最小(1.09 g·cm⁻³)。土壤总孔隙度43.25%~58.83%,非毛管孔隙度为1.42%~16.73%,毛管孔隙度范围为34.82%~46.92%。其中,北美鹅掌楸-金钟花-结缕草、侧柏-南天竹、银杏-麦冬、大叶黄杨的土壤总孔隙度较大(56.26%~58.83%),西府海棠-沿阶草、侧柏-麦冬、牡丹的土壤总孔隙度较小(43.25%~47.28%)。非毛管孔隙度和毛管孔隙度差异显著,其中侧柏-洒金桃叶珊瑚-麦冬的非毛管孔隙度最大(16.73%),西府海棠-沿阶草的非毛管孔隙度最小(1.42%);狗牙根的毛管孔隙度最大(46.92%),侧柏-洒金桃叶珊瑚-麦冬的毛管孔隙最小(34.82%)(表2)。

2.2 不同绿地类型表层土壤饱和导水率和田间持水量

不同绿地类型表层土壤饱和导水率差异显著(图1)。北美鹅掌楸-金钟花-结缕草和银杏-麦冬的土壤饱和导水率显著高于其他样地。其中银杏-麦冬的饱和导水率最大(3.355 mm·min⁻¹),西府海棠-沿阶草的饱和导水率最小(0.790 mm·min⁻¹),其他样地的土壤饱和导水率为0.911~2.952 mm·min⁻¹。

不同绿地类型表层土壤田间持水能力差异显著,其范围为0.25~0.35 cm³·cm⁻³,其中大叶黄杨田间持水量最大(0.35 cm³·cm⁻³),保水能力最好,而西府海棠-沿阶草田间持水量最差(0.25 cm³·cm⁻³),保水能力最弱(图2)。

表 2 不同植被群落类型土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the soils of different vegetation types

植被群落类型	样地编号	容重 BD/(g·cm ⁻³)	总孔隙度 TP/%	非毛管孔隙度 NCP/%	毛管孔隙度 CP/%
乔灌草	1	1.12±0.05de	57.81±1.70ab	13.01±0.87b	44.8±1.45bc
	2	1.28±0.05c	51.55±1.96cd	16.73±1.88a	34.82±0.35f
	3	1.37±0.05bc	48.42±2.04d	3.62±0.89e	44.8±1.20bc
乔灌	4	1.33±0.09bc	49.81±3.35cd	4.44±2.56de	45.37±1.08b
	5	1.16±0.02d	56.26±0.60b	10.58±0.89c	45.68±0.36b
乔草	6	1.09±0.04e	58.83±1.36a	13.71±1.15ab	45.12±0.48b
	7	1.50±0.03a	43.25±1.13d	1.42±1.08e	41.83±0.08d
	8	1.40±0.04b	47.28±1.52d	8.05±1.42cd	39.23±0.31e
草	9	1.24±0.08c	53.32±3.05cd	8.16±1.99cd	45.16±1.26b
	10	1.22±0.03c	54.11±1.01c	7.19±1.43d	46.92±0.57a
灌木	11	1.46±0.05ab	45.02±1.85d	9.51±1.57cd	35.51±0.34f
	12	1.26±0.05c	52.64±1.72cd	11.54±2.32bc	41.1±0.60d
	13	1.15±0.04de	56.45±1.63ab	13.34±1.08ab	43.11±0.62c

注：数据为平均值±标准差，同一土壤指标不同植被中，标注不同字母的表示其统计差异明显(P<0.05)，下同。

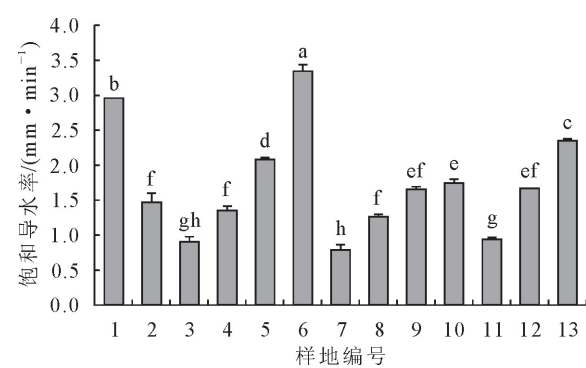


图 1 不同绿地类型表层土壤饱和导水率
Fig. 1 Saturated hydraulic conductivity of surface soil
of different green land types

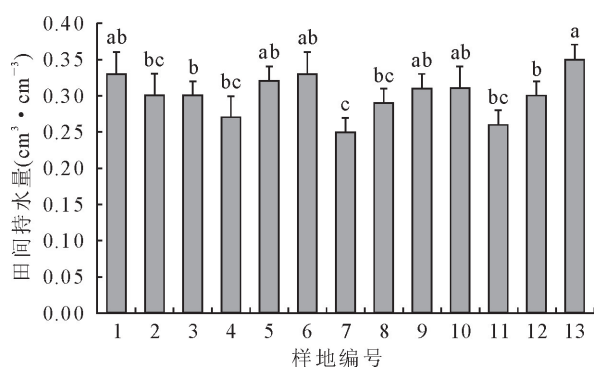


图 2 不同绿地类型表层土壤田间持水量
Fig. 2 Field water holding capacity of surface soil
of different green land types

3 结论与讨论

3.1 表层土壤物理性质的影响因素

本研究中，城市绿地不同植被群落入渗性能和持水能力差异明显，土壤容重、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度对土壤入渗和持水能力影响显著；乔灌草混合配置的绿地具有优异的人渗性能和持水能力，土壤入渗和持水能力明显高于其他配置模式。植被群落中，乔灌草(北美鹅掌

楸-金钟花-结缕草)和乔草(银杏-麦冬)混合配置的绿地的土壤容重小于草(麦冬、狗牙根)单一配置的绿地。乔草混合配置的绿地中，样地 7(西府海棠-沿阶草)的土壤理化性质较差，结合样地位置分析，可能是由于其靠近道路受到踩踏等人为因素影响，导致表层土壤容重增大、孔隙度降低。不同植被群落土壤物理性质差异显著，乔木和灌木的土壤饱和导水率、田间持水量、总孔隙度等明显优于草地^[8]，这与伍海兵等^[13]对上海辰山植物园的研究相一致。草地土壤物理性质相对于乔、灌木较差可能是由于乔木和灌木根系发达，延伸延展范围广，穿透力强，同时根系的分泌物、残体等促使团粒结构的形成，改善了土壤的物理性质^[20]。

3.2 土壤入渗性能和持水能力的影响因素

饱和导水率是土壤入渗的重要指标，受土壤容重和孔隙度等方面的影响。乔灌草和乔草混合配置的绿地(北美鹅掌楸-金钟花-结缕草、银杏-麦冬)的土壤理化性质较好，饱和导水率高，入渗性能好，这可能是乔灌草植被类型的根系发达以及根系活动等的影响，改善了土壤的结构和孔隙特征，提高了入渗性能，这与邢菊香等^[20]的研究结果一致。此外，莫斌等^[21]研究发现林地的土壤入渗能力明显优于草地。赵勇钢等^[22]在对草原区退耕土地的研究中发现，植被的根系系统通过穿插可以改善土壤的结构，从而增大土壤的孔隙，也能显著提高土壤的入渗能力。乔草(西府海棠-沿阶草)和灌木(牡丹)配置的绿地土壤饱和导水率较低，可能是由于人为踩踏，导致土壤容重变大，孔隙度变小，从而使土壤饱和导水率变小^[20]。

田间持水量是土壤持水能力的一种体现，是评价水资源涵养效能和调节水分循环的重要指标，其受到土壤容重、孔隙度及人为压实的影响^[23-24]，田间

持水量越大,土壤对于水分的保持越好。本研究中,不同植物群落的田间持水能力没有显著差别,在乔灌、乔草和灌木混合配置的绿地中,受到人为踩踏因素影响的绿地土壤田间持水量较低,持水能力较弱。这与伍海兵等^[8]研究发现压实作用会导致土壤的饱和含水量和最大有效含水量下降相一致。可通过改善土壤结构如翻耕等来降低土壤容重和增加土壤孔隙度,能够有效地提高绿地土壤持水能力^[25]。

通过合理的植物群落配置,在保证绿地景观要素的同时能够有效缓解城市雨洪灾害,降低城市内涝风险,进一步提高城市绿地的生态服务功能。因此城市绿地在建设时应充分考虑乔灌草混合配置的植物群落,并在绿地周围修建围栏,减少人为活动影响,提高和维持城市绿地的入渗能力和持水能力。

参考文献:

[1] 赵锋,徐波,郭竹梅.城市绿地发展战略研究方法的探讨—关于北京城市绿地系统规划的研究与实践(三)[J].中国园林,2007,23(7):83-86.
ZHAO F,XU B,GUO Z M. Discussion on the urban green space development strategy study—some thoughts on Beijing urban green space system planning (Ⅲ)[J]. Chinese Landscape Architecture,2007,23(7):83-86. (in Chinese)

[2] 林世平,梁伊任.市域绿地系统规划初探(上)[J].西北林学院学报,2008,23(2):204-207.
LIN S P,LIANG Y R. APreliminary exploration of the green system planning in urban area(I) [J]. Journal of Northwest Forestry University,2008,23(2):204-207. (in Chinese)

[3] 杨哈.郑州绿地中雨水资源有效利用的方法与途径研究[D].郑州:河南农业大学,2013.

[4] 张波,史正军,张朝,等.深圳城市绿地土壤孔隙状况与水分特征研究[J].中国农学通报,2012,28(4):299-304.
ZAHNG B,SHI Z J,ZHANG C,*et al.* Study on soil porosity and water characteristics of urban green space in Shenzhen City [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(4):299-304. (in Chinese)

[5] 伍海兵,方海兰.绿地土壤入渗及其对城市生态安全的重要性[J].生态学杂志,2015,34(3):894-900.
WU H B,FANG H L. Research progress on soil infiltration of green space and its importance for municipal ecological security [J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(3):894-900. (in Chinese)

[6] 张甘霖,吴运金,龚子同.城市土壤—城市环境保护的生态屏障[J].自然杂志,2006,28(4):205-209.
ZHANG G L,WU Y J,GONG Z T. Urban soils:an ecological protector of urban en-vironment[J]. Chinese Journal of Nature,2006,28(4):205-209. (in Chinese)

[7] 赵西宁,吴发启.土壤水分入渗的研究进展和评述[J].西北林学院学报,2004,19(1):42-45.
ZHAO X N,WU F Q. Developments and reviews of soil infiltration research[J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,19(1):42-45. (in Chinese)

[8] 伍海兵,方海兰,彭红玲,等.典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J].水土保持学报,2012,26(6):85-90.
WU H B,FANG H L,PENG H L,*et al.* Soil physical properties analysis of the typical newly- established green belt of Shanghai Chenshan botanical garden[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(6):85-90. (in Chinese)

[9] 杨倩,刘目兴,王苗苗,等.武汉市典型绿地植被类型对表层土壤入渗和持水性能的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1324-1333.
YANG Q,LIU M X,WANG M M,*et al.* Characterization of surface soil water infiltration and retention capacity in urban green space of Wuhan City[J]. Resources and Environment In the Yangtze Basin,2019,28(6):1324-1333. (in Chinese)

[10] 侯爱中,唐莉华,张思聪.下凹式绿地和蓄水池对城市型洪水的影响[J].北京水务,2007(2):42-45.

[11] 伍海兵,周建强,方海兰.上海中心城区绿地土壤水库特征[J].应用生态学报,2017,28(3):966-974.
WU H B,ZHOU J Q,FANG H L. Soil water reservoir properties of green belts in the central urban area of Shanghai, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(3):966-974. (in Chinese)

[12] 刘目兴,杜文正,张海林.三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究[J].长江流域资源与环境,2013,22(3):299-306.

[13] 伍海兵,方海兰,彭红玲.典型新建绿地上海辰山植物园土壤水库特征及其影响因子[J].应用生态学报,2016,27(5):1437-1444.

[14] 司志国,俞小鹏,白玉杰,等.徐州城市绿地表层土壤酶活性及其影响因素[J].中南林业科技大学学报,2013,33(2):73-76,80.
SI Z G,YU X P,BAI Y J,*et al.* Soil enzyme activity of urban green land in Xuzhou City and its influencing factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2013,33(2):73-76. (in Chinese)

[15] 刘亚纳,朱书法,魏学锋,等.河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2016,37(6):2322-2328.
LIU Y N,ZHU S F,WEI X F,*et al.* Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different function areas in Luoyang [J]. Environmental Science,2016,37(6):2322-2328. (in Chinese)

[16] YANG L,LI Y,PENG K,*et al.* Nutrients and heavy metals in urban soils under different green space types in Anji,China [J]. Catena,2014,115:39-46.

[17] 李世豪.郑州市区洪涝风险分析及内涝积水模拟研究[D].郑州:郑州大学,2016.

[18] 陈思,徐建新,张修宇.郑州市雨洪资源利用潜力分析[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2019,40(5):70-75.
CHEN S,XU J X,ZHANG X Y. Analysis on the utilization potential of rain and flood resources in Zhengzhou City[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power; Natural Science Edition,2019,40(5):70-75. (in Chinese)

[19] 王瑞永,刘莎莎,王成章,等.不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析[J].草地学报,2009,17(5):621-628.
WANG R Y,LIU S S,WANG C Z,*et al.* Analysis on soil physicochemical indices at different altitudes in alpine range-

land[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(5): 621-628. (in Chinese)

[20] 邢菊香, 郭建英, 赵杏花, 等. 黄土丘陵区退耕还林后土壤物理性质恢复特征的研究—以陕西省吴起县为例[J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(1): 41-46.

[21] 莫斌, 陈晓燕, 杨以翠, 等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(1): 13-17.
MO B, CHEN X Y, YANG Y C, *et al.* Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(1): 13-17. (in Chinese)

[22] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 14-20.
ZHAO Y G, ZHAO S W, CAO L H, *et al.* Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6): 14-20. (in Chinese)

[23] 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[J]. *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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 611-620. (in Chinese)

[24] 刘小林, 郑子龙, 蔺岩雄, 等. 甘肃小陇山林区主要林分类型土壤水分物理性质研究[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(1): 7-11.
LIU X L, ZHENG Z L, LIN Y X, *et al.* Physical characteristics of the soil moisture in the main forest types in Xiaolong Mountain [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(1): 7-11. (in Chinese)

[25] 覃森, 翟禄新, 周正朝, 桂北地区土地利用类型对土壤饱和导水率和持水能力的影响研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 28-32, 39.
QIN M, ZHAI L X, ZHOU Z C. Influence of land use types on soil saturated hydraulic conductivity and water retention in northern Guangxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 28-32, 39. (in Chinese)

(上接第 236 页)

[6] 杨庆, 孙照斌, 雷亚芳, 等. 不同海拔天山云杉木材纤维长度和宽度的研究[J]. *陕西林业科技*, 2001(1): 45-47.
YANG Q, SUN Z B, LEI Y F, *et al.* Length and width of fiber of tianshan spruce at several altitudes[J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2001, (1): 45-47. (in Chinese)

[7] 安培钧, 段新芳, 樊军锋, 等. 三种泡桐无性系木材材性及纤维形态的研究[J]. *西北林学院学报*, 1995, 10(1): 34-37.

[8] 韦鹏练, 黄腾华, 符韵林. 观光木人工林木材物理力学性质的研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(6): 221-225.
WEI P L, HUANG T H, FU Y L. Physical and mechanical properties of *Tsoongidendron odorum* wood[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(6): 221-225. (in Chinese)

[9] 徐慧兰, 陈虎, 颜培栋, 等. 海南南亚松木材材性的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(5): 92-95.
XU H L, CHEN H, YAN P D, *et al.* Study of wood properties of *Pinus latteri* in Hainan province [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(5): 92-95. (in Chinese)

[10] 戴芳天, 郭明辉, 陈广胜. 红松人工林幼林材与成熟材干缩性的比较[J]. *东北林业大学学报*, 2003, 31(3): 29-31.
DAI F T, GUO M H, CHEN G S. Shrinkage of juvenile wood and mature of wood of *Pinus koraiensis* plantation[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(3): 29-31. (in Chinese)

[11] 任世奇, 罗建中, 谢耀坚, 等. 不同桉树无性系及树干高度木材的干缩特性研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(1): 232-237.
REN S Q, LUO J Z, XIE Y J, *et al.* Dry shrinkage properties of different *Eucalyptus* clones and stem height [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(1): 232-237. (in Chinese)

[12] 黄日明, 陈承德. 42 种阔叶树材木纤维长度和宽度的研究[J]. *闽西职业技术学院学报*, 2014, 16(4): 97-102.

[13] 牛敏, 高慧, 赵广杰. 欧美杨 107 应拉木的纤维形态与化学组成[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(2): 141-144.
NIU M, GAO H, ZHAO G J. Fiber morphology and chemical composition of tension wood in *Populus* × *Euramericana* cv. ‘Neva’ [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(2): 141-144. (in Chinese)

[14] 张平冬, 吴峰, 康向阳, 等. 三倍体白杨杂种无性系的纤维性状遗传变异研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(6): 221-225.
ZHANG P D, WU F, KANG X Y, *et al.* Genetic variation of fiber properties of triploid hybrid clones of white poplar[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(6): 221-225. (in Chinese)

[15] 方红, 刘善辉. 造纸纤维原料的评价[J]. *北京木材工业*, 1996, 16(2): 19-22.