

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.002

厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征

刘家宏¹, 王东^{1,2}, 李泽锦¹, 付潇然¹, 张坤^{1,2}, 栾清华², 徐多³

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 河北工程大学水利水电学院, 河北邯郸 056021; 3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘要:为探究厦门海绵城市改造完成区的入渗性能, 利用 Guelph 入渗仪法测量了两条海绵道路及一个海绵小区的土壤饱和导水率, 对比分析了 5 cm 单水头、10 cm 单水头、单水头均值及双水头法所测得土壤饱和导水率的差异, 并与传统城市建设区进行了对比分析。结果表明: 设有生态多孔纤维棉的新顺路绿化带入渗性能最好, 采用一般转输型植草沟的新景路绿化带次之, 而设有隔水顶板、地下为停车场的洋塘居住区 B13 绿地入渗性最差。不同测量方法的结果对比显示, 5 cm 单水头法计算所得的土壤饱和导水率标准差最小, 双水头法的土壤饱和导水率标准差最大; 在厦门进行土壤入渗试验时, 推荐采用 5 cm 单水头法计算土壤饱和导水率。

关键词: 土壤饱和导水率; 海绵城市; Guelph 入渗仪; 单水头法; 双水头法; 厦门

中图分类号: P334 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2019)06-0009-05

Measurement and characteristic analysis of infiltration performance in Xiamen spongification reconstruction area

// LIU Jiahong¹, WANG Dong^{1,2}, LI Zejin¹, FU Xiaoran¹, ZHANG Kun^{1,2}, LUAN Qinghua², XU Duo³ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China; 3. China Railway Construction Bridge Engineering Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to explore the infiltration performance of Xiamen sponge city reconstruction completed area, the soil saturated hydraulic conductivity of two sponge roads and a sponge plot was measured by Guelph infiltrometer. The differences of soil saturated hydraulic conductivity measured by 5 cm single-head, 10 cm single head, single-head mean and double-head method were compared and analyzed. The soil saturated hydraulic conductivity in spongy and non-spongy areas was also compared. The results show that the infiltration performance of Xinshun Road greenbelt with ecological porous fibre cotton is the best, followed by Xinjing Road greenbelt with general transfer grass-planting trench, while the infiltration performance of B13 green space in Yangtang residential area with waterproof roof and underground parking lot is the worst. The results of different water head measurements show that the standard deviation of soil saturated hydraulic conductivity calculated by 5cm single-head method is the smallest, and that of double-head method is the largest. It is recommended that 5cm single-head method be used to calculate soil saturated hydraulic conductivity in Xiamen for soil infiltration test.

Key words: soil saturated hydraulic conductivity; sponge city; Guelph infiltrometer; single-head method; double-head method; Xiamen City

快速城镇化和雨岛效应导致城市内涝日益严峻, 传统的雨水“快排式”模式很难从根本上解决我国城市内涝问题。自 2014 年中华人民共和国住房和城乡建设部(以下简称住建部)发布《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》

以来, 海绵城市已成为专家学者热议的话题^[1-2]。Wang 等^[3]对海绵城市的内涵、目标和特点进行了总结, 讨论了海绵城市的挑战、研究需求及发展方向, 并提出了海绵城市构建的系统模式; 张建云等^[4]从城市水文过程的角度, 系统解析了海绵城市

的概念,并探讨了海绵城市建设的目标与指标、建设功能与发展方向、城市地下排蓄系统、建设管理体制等若干问题;崔广柏等^[5]探讨了海绵城市与流域控制的相互关系以及流域控制的基本措施。

随着海绵城市试点的推进,其建成后的效果逐渐成为当前研究的热点^[6-7]。海绵城市建设的“六字箴言”为“渗、滞、蓄、净、用、排”,其中“渗”是海绵城市建设六大要素之首,但目前关于海绵化改造区入渗性能效果的研究相当匮乏。众所周知,土壤饱和和导水率是表征土壤入渗能力的关键参数^[8],影响着水文循环过程中入渗、径流及蒸发三者间的水量分配关系^[9],且当土壤达到稳定入渗之后,饱和和导水率在数值上又与稳定入渗率相接近^[10]。因此土壤饱和和导水率可作为判断海绵城市入渗效果的重要参数。目前,土壤饱和和导水率的测定方法众多,包括定水头法、单/双环法、Guelph 入渗仪法等。姚毓菲等^[11]利用定水头法探究了测定时间对土壤饱和和导水率的影响;吕刚等^[12]利用室内定水头法探究了不同复垦方式排土场砾石对土壤饱和和导水率的影响;何锦等^[13]利用双环入渗仪测定了土壤的入渗曲线,发现土壤入渗参数服从正态分布,且具有空间变异性;姜顺龙等^[14]利用单、双环法及室内变水头法测定了土石坝防渗心墙料渗透系数,并进行了分析对比;王红兰等^[15]采用 Guelph 入渗仪测量林地和坡耕地土壤的饱和和导水率,并对比分析了单水头法和双水头法所测得的饱和和导水率的差异;翟子宁等^[16]验证了 Guelph 入渗仪法进行室内模拟的可行性,并研究了松华坝水源区不同土地利用类型对土壤入渗性能的影响。此外,土壤饱和和导水率的测定方法还有圆盘渗透仪法^[17]、Philip-Dunne 入渗仪法^[18]等。在众多方法中,Guelph 入渗仪法具有在现场直接测定的优势,且仪器设计和造型轻巧,实际操作简单省力,在国内外得到了广泛的应用^[19]。本研究选择 Guelph 入渗仪法探究厦门市海绵化改造区土壤入渗性能,采用单水头法和双水头法分别测定海绵化改造完成单元的土壤饱和和导水率,分析厦门市海绵化改造区土壤入渗特性,并对传统城市建设单元的土壤进行对比试验,以对比分析海绵化改造和传统开发单元土壤入渗特性的差异,旨在为评估海绵城市建设的入渗效果提供数据支撑。

1 研究区概况

厦门地处福建省东南部,多年平均水资源总量 12.47 亿 m^3 ,人均水资源量 562 m^3 ,仅为全省平均值的 1/6,远低于国际公认的人均水资源 1700 m^3 的警戒线^[20],属极度缺水地区,并且常受台风等极端天

气的影响,易出现短时强降雨,产生城市洪涝灾害。基于这一情况,厦门入选我国首批海绵城市试点,自 2015 年起,厦门市政府在海沧马銮湾片区和翔安新城片区两个试点区大力推行海绵城市建设,目前已基本建设完成。

本文选取位于厦门市海沧区的新顺路、新景路两条海绵化改造的道路和翔安区洋塘居住区的 B13 地块(以下简称“洋塘小区”)作为试验地点。新顺路海绵化改造工程北起翁角路交叉口,南至阳光西路交叉口,全长 797 m,其道路绿化带采用生态多孔纤维棉进行海绵化改造。新景路海绵化改造工程南起阳光路,终点至翁角路,道路呈南北走向,长度为 650 m,其道路绿化带采用普通的土壤改良处理。洋塘小区位于翔安新城片区核心区,是以海绵小区的标准建设而成,总面积为 4.2 hm^2 。试验测点分别位于两条道路旁的绿化带及小区内地下停车场的上覆土绿地。此外,为探求海绵化改造的土壤相对于传统城市建设区域的土壤入渗性能的差异,本文选取了同样位于厦门市的阳光路和金尚小区进行对比分析。这两处试验地点都属于传统城市开发模式下的常规道路和居住区,均无海绵化改造措施。

2 试验仪器及方法

2.1 试验仪器

试验采用 Eijkelkamp Agrisearch Equipment 公司生产的 2800 型号 Guelph 入渗仪测定土壤饱和和导水率。该仪器基于马里奥特瓶原理及三维流原理^[21-22],由供水部件和入渗部件组成(图 1),供水部件可根据土壤入渗性能选择内部供水或内外部同时供水,由调节阀门控制,入渗部件可以直接放入土壤用来测定入渗参数。该仪器能快速准确测定土壤饱和和导水率,易于搬运、操作,适合于野外试验。

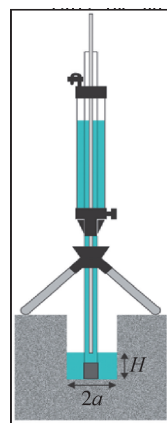


图1 Guelph 入渗仪

2.2 土壤饱和和导水率计算方法

土壤饱和和导水率是土壤中的空隙全部被水充

满、土壤水分连续性最好、基质势为 0 时的导水率。Guelph 入渗仪法可采用单水头法^[23]或双水头法^[24]计算公式求解土壤饱和导水率。

2.2.1 单水头法

单水头法的土壤饱和导水率 K_{fs} 的计算公式为

$$K_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi \left(\frac{H}{a^*}\right)} \quad (1)$$

式中: H 为水头, cm; a 为入渗孔半径, cm; Q 为稳定流量, cm^3/s (本次试验取 $Q = R \times 35.22 \text{ cm}^2$, R 为蓄水管水位稳定下降速率, cm/s); C 为形状因子, 是根据微观毛管因子 α^* 确定的, α^* 为关于土壤质地结构等的一个综合参数。形状因子 C 的求解方法根据土壤质地的不同可分别采用公式(2)~(4)计算:

$$C = \left[\frac{H/a}{2.081 + 0.121(H/a^*)} \right]^{0.672} \quad (2)$$

$$C = \left[\frac{H/a}{1.992 + 0.091(H/a^*)} \right]^{0.683} \quad (3)$$

$$C = \left[\frac{H/a}{2.074 + 0.093(H/a^*)} \right]^{0.754} \quad (4)$$

式(2)适用于压实或非结构化的黏土或淤泥, $\alpha^* = 0.01$; 式(3)适用于细质地(黏土或粉砂质)和非结构化的土壤, $\alpha^* = 0.04$; 式(4)适用于大多数结构土壤, 还包括非结构化的砂土及含有大量裂隙或空隙的土壤, $\alpha^* \geq 0.12$ 。

2.2.2 双水头法

双水头法的土壤饱和导水率 K_{fs} 的计算公式为

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (5)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为两次试验的稳定流量, cm^3/s (本次试验取 $Q_1 = R_1 \times 35.22 \text{ cm}^2$, $Q_2 = R_2 \times 35.22 \text{ cm}^2$, R_1 、 R_2 分别为两次试验的蓄水管水位稳定下降速率, cm/s); G_1 、 G_2 为入渗环形状系数, 计算公式为

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (6)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (7)$$

式中: H_1 和 H_2 分别为两次试验的水头, cm; C_1 、 C_2 为两次试验的形状因子, 可以根据土壤质地选择式(2)(3)或(4)及相应的参数 α^* 进行计算。

试验的时间为夏季, 气候炎热湿润, 并且连续超过 5 d 未下雨, 土壤处于不饱和状态。钻取土样观察到土壤的结构属于结构化土壤, 还包括一些中细砂, 因此采用蓄水管内外部同时供水的方法来进行试验, 并且微观毛管因子 α^* 取 0.12, 利用式(4)计

算形状因子 C 。因城市人为干扰因素较多, 为精确计算土壤饱和导水率, 本研究综合采用单、双水头公式等多种方法对土壤饱和导水率进行测定, 其中包括 5 cm 单水头法、10 cm 单水头法、单水头均值法(即两次单水头法计算结果的均值、双水头法)。

3 试验结果与分析

3.1 不同方法所得饱和导水率的差异

在经过海绵化改造的区域进行了多次试验, 排除由于人为因素(如没有保持钻孔恒定水深、漏读、漏记等)所导致的错误结果, 共得到 28 组有效数据, 其中新顺路 8 组、新景路 10 组、洋塘小区 10 组。饱和导水率的计算结果如图 2 所示。

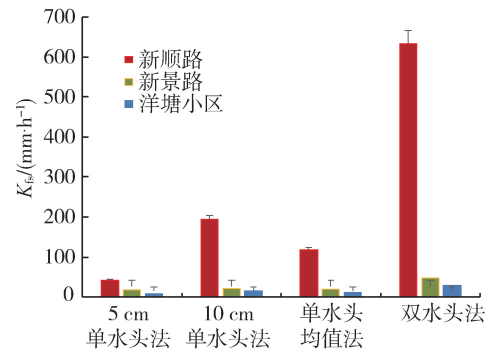


图 2 不同方法测得的 K_{fs} 值

由图 2 可见, 无论采用什么方法得到的土壤饱和导水率, 新顺路最大、新景路次之、洋塘小区最小, 并且不同方法计算得到的结果差异较为明显, 其中, 在双水头法中, 新顺路饱和导水率是洋塘小区的 21.57 倍。究其原因, 3 处试验测点的海绵化改造工程有所差异。新顺路旁的绿化带地下设有高透水的生态多孔纤维棉, 该材料透水性极高, 空隙率高达 96.1%, 其蓄水量较大, 蓄水体积与产品体积接近 1:1; 新景路旁的绿化带为运输型植草沟, 土壤进行了置换, 主要起快速收集及运输雨水到旁边雨水花园的作用, 即海绵城市建设六要素中“排”的效果; 而洋塘小区内的绿地为覆土绿地, 覆盖景观植物的土壤从上到下依次包括砾石层、混合土层及有机质, 土壤下设有隔水顶板, 地下建有停车场, 上层覆土入渗性能相较于其他海绵化改造措施来说不能太强, 蓄水量不能太大, 否则影响地下停车场的正常运行。

对同一海绵化改造地点来说, 不同方法的计算结果也存在较大差异, 计算结果从大到小依次为双水头法、10 cm 单水头法、单水头均值法、5 cm 单水头法, 其中, 新顺路利用双水头法计算所得的土壤饱和导水率是 5 cm 单水头法计算结果的 15.25 倍。对新顺路的 8 组试验数据的进一步分析表明, 蓄水管水位稳定下降速率差异较大, 在双水头法的计算

结果中,土壤饱和和导水率最大值是最小值的 22.15 倍。测量结果的不确定性较大,反映了土壤的空间异质性较大。为了精确评价每种方法计算所得土壤饱和和导水率的差异性,各试验测点不同方法计算结果的标准差列于表 1。由表 1 可知,洋塘小区所有方法计算所得土壤饱和和导水率的标准差最小,新景路次之,新顺路最大,其中,新顺路双水头法计算所得土壤饱和和导水率的标准差最大为 0.908,可见新顺路入渗过程的随机性较大。究其原因,主要是因为土壤结构的空間異質性,新順路、新景路及洋塘小区的土壤均进行了置换处理,土壤竖向结构复杂,每层土壤的理化性质存在较大差异;新顺路地下埋有生态多孔纤维棉,使土壤结构更加复杂,竖向结构更加多变,而洋塘小区因地下为停车场,土壤厚度不是太大,土层结构相对简单,因此新顺路土壤空间异质性最大,而洋塘小区相对较小。此外,所有方法计算所得土壤饱和和导水率中,5 cm 单水头法计算结果的标准差最小,双水头法计算结果的标准差最大,说明在所有方法中,利用 5 cm 单水头法计算所得土壤饱和和导水率的离散程度较小,误差较小,在本研究区域,利用 5 cm 单水头法计算土壤饱和和导水率的适应性较好,且该方法综合考虑了压力势、重力势及毛细管力对水分流动的影响,因此,在该研究区域的海绵化改造区测定土壤入渗性能时,推荐使用 5 cm 单水头法。

表 1 海绵化改造区不同方法所得 K_s 的标准差

单位:mm/h				
试验地点	5 cm 单水头法	10 cm 单水头法	单水头均值法	双水头法
新 顺 路	0.053	0.254	0.144	0.908
新 景 路	0.022	0.032	0.024	0.073
洋塘小区	0.009	0.029	0.016	0.052

3.2 对比试验结果分析

在传统城市建设区域阳光路和金尚小区进行了同样的试验,试验结果如图 3 所示。

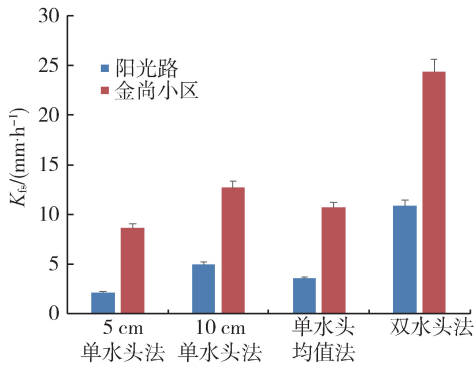


图 3 阳光路及金尚小区计算所得 K_s 值

由图 3 可知,金尚小区的土壤饱和和导水率大于阳光路,主要原因是金尚小区作为居民区,小区花园绿

地土壤较一般道路绿地的土壤入渗性能好。由表 2 可知,5 cm 单水头法计算所得的土壤饱和和导水率较其他方法标准差要小,说明该方法所计算的结果较为可靠。可见在厦门市传统城市建设区进行土壤饱和和导水率试验时,5 cm 单水头法同样适应性较好。

表 2 传统城市建设区不同方法所得 K_s 的

标准差	单位:mm/h			
	试验地点	5 cm 单水头法	10 cm 单水头法	单水头均值法 双水头法
阳光路	0.021	0.032	0.025	0.075
金尚小区	0.015	0.022	0.018	0.056

以 5 cm 单水头计算结果为标准,新顺路土壤饱和和导水率是阳光路的 19.58 倍,新景路是阳光路的 8.23 倍,洋塘小区是金尚小区的 1.02 倍,可见经过海绵化改造的道路比一般市政道路的土壤入渗速率要快,而埋有生态多孔纤维棉的新顺路入渗性能更好。对于经过海绵化改造的洋塘小区来说,其土壤饱和和导水率与传统金尚小区相差不大,原因主要是洋塘小区地下为停车场,设有隔水顶板,其覆土厚度不大,蓄水能力有限,因此产生了与一般小区的土壤入渗性能差别不大的效果。可见洋塘小区 B13 地块虽进行了海绵化改造,但因海绵化改造目的及措施的局限性,其土壤入渗效果一般,难以起“渗”的作用。

4 结 论

- a. 在不同海绵化改造措施的土壤中,采用生态多孔纤维棉海绵化改造的新顺路土壤入渗能力最大,采用一般转输型植草沟海绵化改造措施的新景路次之,而设有隔水顶板、地下为停车场的上覆土绿地入渗效果最差。
- b. 海绵化改造单元和传统开发单元的对比试验结果显示,经过海绵化改造的道路绿化带比一般传统道路的绿化带土壤入渗性能高,经过生态多孔纤维棉改良的道路绿化带的土壤饱和和导水率比一般道路绿化带高约 20 倍;经过普通土壤改良的道路绿化带的土壤饱和和导水率比一般道路绿化带高约 8 倍,海绵小区地下停车场的上覆土绿地由于下层存在隔水顶板,其入渗效果不佳,土壤饱和和导水率与一般传统小区相当。
- c. 由于土壤结构空间上的异质性,每次试验测得的土壤饱和和导水率都不一样,新顺路 8 组数据计算得到的土壤饱和和导水率最大相差 22.15 倍;不同方法测得的土壤饱和和导水率结果差别也很大,5 cm 单水头法计算结果标准差最小,双水头法最大;在厦门市海绵化改造区进行土壤入渗试验时,建议采用 5 cm 单水头法,该方法的可靠性和稳定性更高。

参考文献:

- [1] 张伟,车伍.海绵城市建设内涵与多视角解析[J].水资源保护,2016,32(6):19-26. (ZHANG Wei, CHE Wu. Connotation and multi-angle analysis of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):19-26. (in Chinese))
- [2] 马海良,姜明栋,侯雅如.江苏省海绵城市建设的战略分析和路径规划[J].水利经济,2017,35(6):6-11. (MA Hailiang, JIANG Mingdong, HOU Yaru. Strategic analysis and path planning of constructing sponge cities in Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(6):6-11 (in Chinese))
- [3] WANG H, MEI C, LIU J H, et al. A new strategy for integrated urban water management in China: sponge City [J]. Science China (Technological Sciences), 2018, 61(03):317-329.
- [4] 张建云,王银堂,胡庆芳,等.海绵城市建设有关问题讨论[J].水科学进展,2016,27(6):793-799. (ZHANG Janyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponge city construction in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6):793-799. (in Chinese))
- [5] 崔广柏,张其成,湛忠宇,等.海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J].水资源保护,2016,32(2):1-4. (CUI Guangbo, ZHANG Qicheng, ZHAN Zhongyu, et al. Research progress and discussion of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):1-4. (in Chinese))
- [6] 夏军,石卫,王强,等.海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J].水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1):1-8. (in Chinese))
- [7] 张爱玲,宫永伟,印定坤,等.济南历阳河流域海绵城市建设的水文效应分析[J].中国给水排水,2018,34(13):135-138. (ZHANG Ailing, GONG Yongwei, YIN Dingkun, et al. Hydrological effect analysis for sponge city construction in Liyang River watershed of Jinan, China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13):135-138. (in Chinese))
- [8] 白冰,陈效民,秦淑平.黄河三角洲滨海盐渍土饱和导水率的研究[J].土壤通报,2005,36(3):321-323. (BAI Bing, CHEN Xiaomin, QIN Shuping. Saturated hydraulic conductivity of seashore saline soil in Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 26(3):321-323. (in Chinese))
- [9] 郑继勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56. (ZHENG Jiyong, SHAO Mangan, ZHANG Xingchang. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3):53-56. (in Chinese))
- [10] 闵雷雷,于静洁,张广英,等.三种方法测估的林地稳渗率对比初探[J].南水北调与水利科技,2010,8(5):36-38. (MIN Leilei, YU Jingjie, ZHANG Guangying, et al. Preliminary comparison of steady infiltration rate in woodland by the three methods [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5):36-38. (in Chinese))
- [11] 姚毓菲,邵明安.测定时间对定水头法土壤饱和导水率的影响[J].土壤通报,2015,46(2):327-333. (YAO Yufei, SHAO Mangan. Effect of measure time on soil saturated hydraulic conductivity by constant head method [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2):327-333. (in Chinese))
- [12] 吕刚,王磊,卢喜平,等.不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和贮水能力的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1414-1426. (WU Gang, WANG Lei, LU Xingping, et al. The Effect of gravel on saturated hydraulic conductivity and water storage capacity in reclaimed dump relative to reclamation mode [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6):1414-1426. (in Chinese))
- [13] 何锦,付雷,刘元晴,等.区域尺度下土壤入渗特征参数的空间变异性研究[J].节水灌溉,2015(9):23-26. (HE Jin, FU Lei, LIU Yuanqing, et al. Study on spatial variation of soil infiltration characteristic parameters in the region scale [J]. Water Saving Irrigation, 2015(9):23-26. (in Chinese))
- [14] 姜顺龙,邱晓亮.土石坝防渗心墙料渗透系数测试方法对比研究[J].人民长江,2015,46(8):87-91. (JIANG Shunlong, QIU Xiaoliang. Comparative study on measuring method of permeability coefficient of impervious core material in earth-rock dam [J]. Yangtze River, 2015, 46(8):87-91. (in Chinese))
- [15] 王红兰,宋松柏,唐翔宇.基于Guelph法的土壤饱和导水率测定方法对比[J].农业工程学报,2012,28(24):99-104. (WANG Honglan, SONG Songbai, TANG Xiangyu. Comparison of determination methods for saturated soil hydraulic conductivity with Guelph infiltrometer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(24):99-104. (in Chinese))
- [16] 翟子宁,王克勤,苏备. Guelph入渗仪在松华坝水源区土壤入渗性能上的应用[J].四川农业大学学报,2016,34(2):215-220. (ZHAI Zining, WANG Keqin, SU Bei. Application of Guelph permeameter in determining the soil permeability of the Songhuaba water source area in Kunming City [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2016, 34(2):215-220. (in Chinese))
- [17] MESSING I, JARVIS J. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers [J]. Journal of Soil Science, 1993, 44:11-24.

- based on grey water footprint in Dongting Lake area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 152-160. (in Chinese))
- [8] 孙才志, 白天骄, 韩琴. 基于基尼系数的中国灰水足迹区域与结构均衡性分析[J]. 自然资源学报, 2016, 31(12): 2047-2059. (SUN Caizhi, BAI Tianjiao, HAN Qin. The regional and structural equilibrium analysis of grey water footprint in China based on Gini coefficient [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2047-2059. (in Chinese))
- [9] 韩琴, 孙才志, 邹玮. 1998—2012 年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179-1191. (HAN Qin, SUN Caizhi, ZOU Wei. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012 [J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1179-1191. (in Chinese))
- [10] 孙才志, 白天骄, 韩琴. 要素与效率耦合视角下中国人均灰水足迹驱动效应研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1490-1502. (SUN Caizhi, BAI Tianjiao, HAN Qin. Driving effect of per capita grey water footprint in China from the perspective of factor and efficiency coupling [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1490-1502. (in Chinese))
- [11] 孙才志, 韩琴. 中国省际灰水足迹测度及其灰水足迹荷载系数的空间关联格局分析[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 86-97. (SUN Caizhi, HAN Qin. The spatial correlation of the provincial grey water footprint and its loading coefficient in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 86-97. (in Chinese))
- [12] 白天骄. 中国灰水足迹研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2018.
- [13] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 571-582. (SUN Caizhi, CHEN Shuan, ZHAO Lianshi. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 571-582. (in Chinese))
- [14] 李敬, 陈澍, 万广华, 等. 中国区域经济增长的空间关联及其解释: 基于网络分析方法[J]. 经济研究, 2014, 49(11): 4-16. (LI Jin, CHEN Shu, WAN Guanghua, et al. Study on the spatial correlation and explanation of regional economic growth in China: based on analytic network process [J]. Economic Research Journal, 2014, 49(11): 4-16. (in Chinese))
- [15] 徐振宇. 社会网络分析在经济学领域的应用进展[J]. 经济学动态, 2013(10): 61-72. (XU Zhenyu. Progress in the application of social network analysis in economics [J]. Economics Information, 2013(10): 61-72. (in Chinese))
- [16] 刘华军, 何礼伟. 中国省际经济增长的空间关联网结构: 基于非线性 Granger 因果检验方法的再考察[J]. 财经研究, 2016, 42(2): 97-107. (LIU Huajun, HE Liwei. The spatial network structure of China's provincial economic growth: re-examination based on nonlinear granger causality test [J]. Journal of Finance and Economics, 2016, 42(2): 97-107. (in Chinese))
- [17] 孙克, 聂坚, 游细斌, 等. 长江中游城市群生产性服务业的分工特征及空间效应分析[J]. 经济地理, 2018, 38(2): 123-132. (SUN Ke, NIE Jian, YOU Xibin, et al. Spatial division and spatial effect of producer service in the urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River [J]. Economic Geography, 2018, 38(2): 123-132. (in Chinese))
- [18] 汤放华, 汤慧, 孙倩, 等. 长江中游城市群经济网络结构分析[J]. 地理学报, 2013, 68(10): 1357-1366. (TANG Fanghua, TANG Hui, SUN Qian, et al. Analysis of the economic network structure of urban agglomerations in the middle Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1357-1366. (in Chinese))
- [19] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网结构特征及其效应研究[J]. 中国工业经济, 2015(5): 83-95. (LIU Huajun, LIU Chuangming, SUN Yanan. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effects in China [J]. China Industrial Economics, 2015(5): 83-95. (in Chinese))
- [20] 刘军. 整体网分析[M]. 上海: 上海人民出版社, 2014. (收稿日期: 2018-12-17 编辑: 熊水斌)

(上接第 13 页)

- [18] 任尚岗. 土壤水力参数测算方法及其空间变异性研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2011.
- [19] 于东升, 史学正. 用 Guelph 法研究不同土地利用方式下富铁土的土壤渗透性[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998(4): 14-19. (YU Dongshen, SHI Xuezheng. Study on Ferri-soils infiltration under different land-use by using Guelph permeameter in South China [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998(4): 14-19. (in Chinese))
- [20] 林俊宏. 厦门市水资源可持续利用评价[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 51-56. (LIN Junhong. Assessment of sustainable utilization of urban water resources in Xiamen City [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 51-56. (in Chinese))
- [21] ZANGAR C N. Theory and problems of water percolation [M]. Denver: Technical Information Office Denver Federal Center, 1956.
- [22] REYNOLDS W, ELRICK D. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the Guelph Permeameter [J]. Soil Science, 1985, 140: 292-302.
- [23] ZHANG Z F, GROENEVELT P H, PARKIN G W. The well-shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter [J]. Soil and Tillage Research, 1998, 49(3): 219-221.
- [24] YANG J L, ZHANG G L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(5): 751-761. (收稿日期: 2019-03-17 编辑: 彭桃英)